



# Тема урока:

- Закон электромагнитной индукции. Правило Ленца, явление самоиндукции. Индуктивность

# Хронология открытия законов магнитного поля

В 1820 г. Эрстед открыл явление отклонения магнитной стрелки гальваническим током и тем самым сделал первый существенный шаг в выявлении характера связи электрических и магнитных полей. Ампер обнаружил взаимодействие между проводниками, по которым проходят токи. Им же была выдвинута гипотеза о том, что свойства постоянных магнитов обусловлены циркулирующими в их толще постоянными круговыми токами (молекулярными токами). Был сделан общий вывод:

*вокруг всякого проводника с током есть магнитное поле.*

Связь магнитного поля с током привела к многочисленным попыткам *возбудить ток в контуре с помощью магнитного поля.* Эта фундаментальная задача была блестяще решена в 1831 г английским физиком М. Фарадеем, открывшим *явление электромагнитной индукции.*

# Опыты Фарадея. Индукционный ток

Рассмотрим классические опыты Фарадея, с помощью которых было обнаружено явление электромагнитной индукции

Рис.1

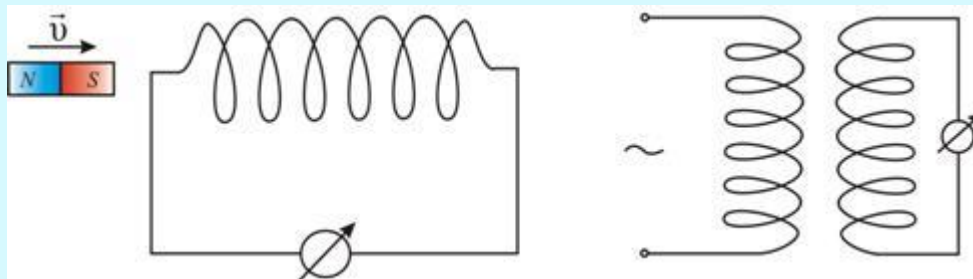
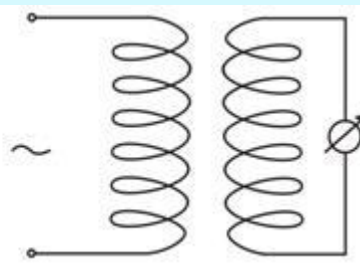
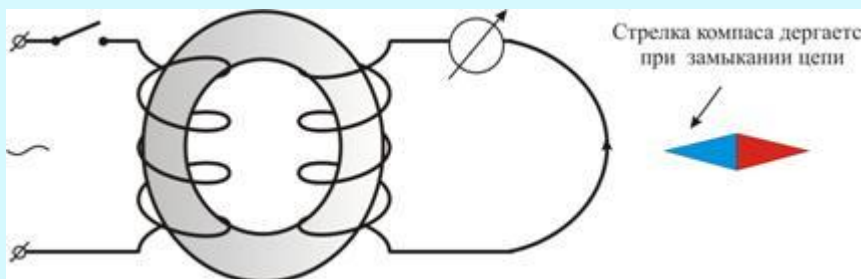


Рис.2,



Если подносить постоянный магнит к катушке или относить от нее (рис.1), то в катушке возникнет электрический ток. Отклонение стрелки гальванометра тем больше, чем больше скорость движения магнита относительно катушки. Подобное происходит с двумя близко расположенными катушками (рис.2): если к одной из них подключить источник переменного тока, то в другой также возникнет переменный ток (этот ток получил название *индукционного тока*).

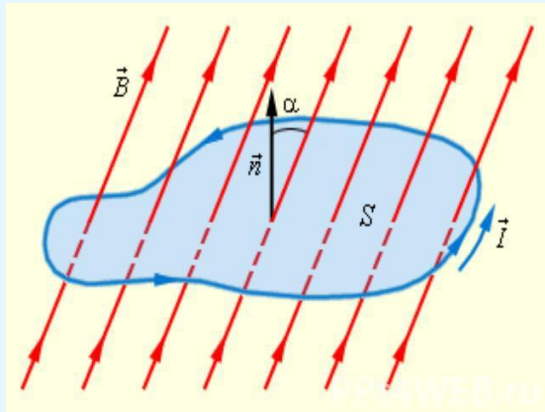
Рис.3



Лучше всего этот эффект проявляется, если две катушки соединить сердечником (рис.3).

## Электромагнитная индукция. Правило Ленца

*Электромагнитная индукция - физическое явление, заключающееся в возникновении электрического (индукционного) тока в замкнутом проводящем контуре при изменении **потока** магнитной индукции через поверхность, ограниченную этим контуром.*



Итак, движущиеся заряды (токи) создают магнитное поле, а движущееся магнитное поле создает (вихревое) электрическое поле и собственно индукционный ток.

Для каждого конкретного случая Фарадей указывал направление индукционного тока.

$$\Phi = BS \cos \alpha$$

В 1831 г. русский физик Э.Ленц установил общее правило нахождения направления индукционного тока, которое называется **правилом Ленца**.

Единица магнитного потока - вебер (1 Вб)

## Индукционный ток

Опытным путем было установлено, что значение индукционного тока совершенно не зависит от способа изменения потока магнитной индукции сквозь контур, а определяется лишь *скоростью* его изменения.

Согласно определению магнитного потока  $\Phi = BS \cos \alpha$

Существует три возможных способов изменения потока:

1. Путем *изменения величины  $B$  магнитной индукции.*
2. Путем *изменения площади контура  $\Delta S$ , через который проходит магнитный поток.*
3. Путем *изменения угла  $\alpha$  (вращением контура)*

## Закон Фарадея. Правило Ленца

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

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

знак << - >> соответствует правилу Ленца

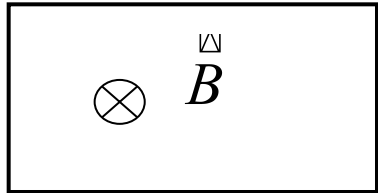
Правило Ленца



Индукционный ток в контуре имеет всегда такое направление, что создаваемое им магнитное поле препятствует изменению магнитного потока, вызывающему этот индукционный ток.

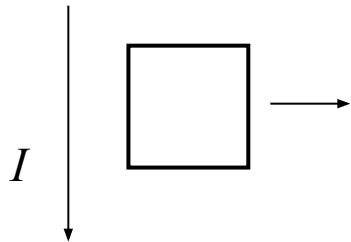
### Тест 1

# Правило Ленца



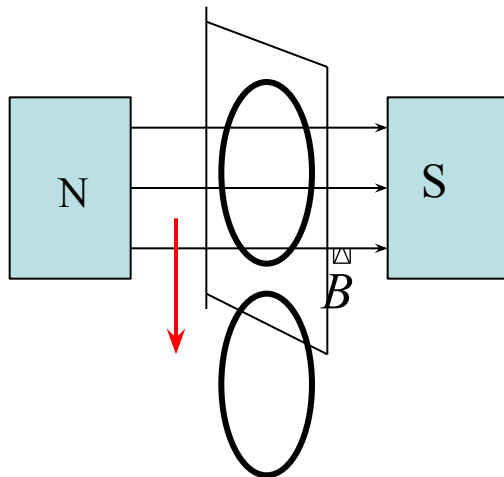
Проводящий контур расположен в магнитном поле, как показано на рисунке. В направлении поля индукция магнитного поля возрастает ( $dB/dt > 0$ ). Определить направление индуцированного тока, возникающего в контуре.

### Тест 2



Определить направление индукционного тока в прямоугольном контуре, удаляемом от прямого проводника с током

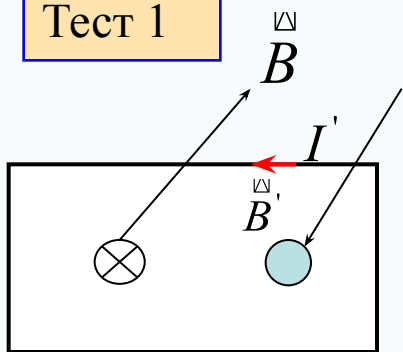
### Тест 3



Медное кольцо находится в однородном магнитном поле (между полюсами магнита). Какого направления будет индукционный ток, появившийся при удалении кольца из магнитного поля?

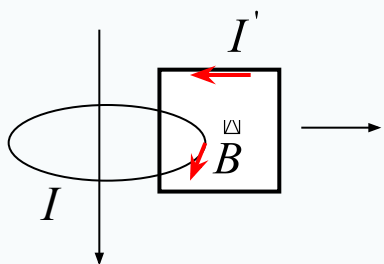
# Правило Ленца

Тест 1



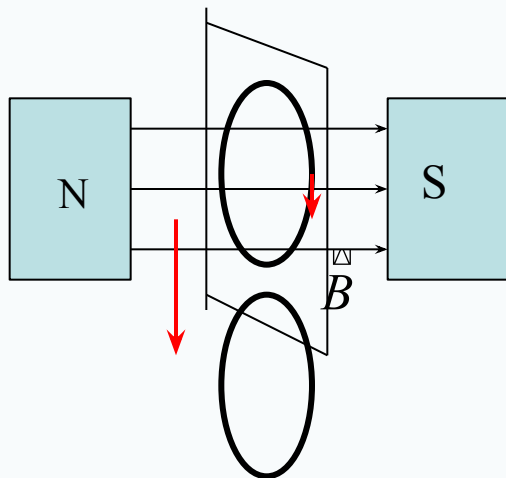
Проводящий контур расположен в магнитном поле, как показано на рисунке. В направлении поля индукция магнитного поля возрастает ( $dB/dt > 0$ ). Определить направление индуцированного тока, возникающего в контуре.

Тест 2



Определить направление индукционного тока в прямоугольном контуре, удаляемом от прямого проводника с током

Тест 3



Медное кольцо находится в однородном магнитном поле (между полюсами магнита). Какого направления будет индукционный ток, появившийся при удалении кольца из магнитного поля?

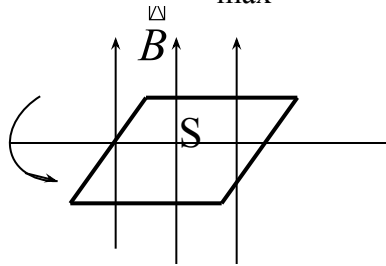


### Задача 1

В однородном магнитном поле с индукцией 5 Тл равномерно с частотой 600 Гц вращается рамка, которая содержит 950 витков и имеет площадь  $64 \text{ см}^2$ . Ось вращения лежит в плоскости рамки и перпендикулярна линиям поля. Найти максимальную величину ЭДС индукции, возникающей в рамке.

Дано:  $B = 5 \text{ Тл}$ ;  $\nu = 600 \text{ Гц}$ ;  $N = 950$ ;  $S = 64 \text{ см}^2$

Найти:  $\varepsilon_{\max}$



Решение

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

$$\Phi = BS \cos \alpha = BS \cos \omega t,$$

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt} = BS\omega \sin \omega t$$

$$\psi = N\Phi$$

$$\omega = 2\pi\nu$$

$$\varepsilon_{\max} = NBS2\pi\nu$$



$$\varepsilon_{\max} = 900 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 64 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 10 = 1,8 \text{ В}$$

Ответ:  $\varepsilon_{\max} = 1,8 \text{ В}$

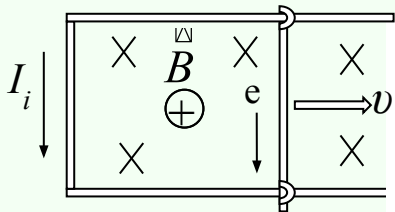
# Природа ЭДС индукции

Ответим на вопрос: *что является причиной движения зарядов, причиной возникновения индукционного тока?* Рассмотрим два случая:

1 - проводник *перемещается* в однородном магнитном поле  $\vec{B}$ ;

2 - проводник *неподвижен*, а меняется магнитный поток.

- ① В однородном магнитном поле находится проводящий контур, одна сторона которого (перемычка) может перемещаться (рис.) Предполагается, что сторонняя ЭДС отсутствует. Начнем двигать перемычку вправо со скоростью  $v$ . С такой же скоростью начнут двигаться носители тока в перемычке (электроны). Из-за наличия магнитного поля на каждый электрон начнет действовать сила Лоренца. Электроны будут перемещаться вниз, а ток направлен вверх; возникает разность потенциалов. Это и будет  $\varepsilon_i$  - *сторонняя сила*, под действием которой течет ток.



*Причиной возникновения индукционного тока в подвижных проводниках является сила Лоренца.*

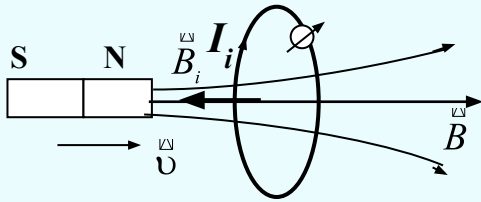
## Природа ЭДС индукции

2

Замкнутый проводник неподвижен. Будем изменять величину магнитного потока, пронизывающего этот виток (например, приближая к нему постоянный магнит, рис.).

При приближении (или удалении) магнита будет наблюдаться возникновение индукционного тока

Но объяснить его появление силой Лоренца нельзя, т.к. на неподвижные заряды магнитное поле не действует.



Ответ был дан Дж.Максвеллом в 1860 г.:

*всякое переменное магнитное поле возбуждает в окружающем пространстве переменное электрическое поле  $\vec{E}'$  (вихревое поле)*

*Сущность явления электромагнитной индукции* совсем не в появлении индукционного тока (ток появляется тогда, когда есть заряды и замкнута цепь), а *в возникновении вихревого электрического поля (не только в проводнике, но и в окружающем пространстве, в вакууме).*

## Свойства вихревого электрического поля

- Вихревое поле имеет совершенно иную структуру, нежели поле, создаваемое зарядами. Так как оно не создается зарядами, то силовые линии не могут начинаться и заканчиваться на зарядах, как это было в электростатике.
- Силовые линии вихревого поля замкнуты.
- Так как это поле перемещает заряды, вихревое поле - силовое поле  $\boxed{\vec{F}' = q\vec{E}'}$
- Работа вихревого поля на замкнутом пути не равна нулю

# Вращение рамки в магнитном поле

Явление электромагнитной индукции применяется для преобразования механической энергии в энергию электрического тока. Для этой цели используются **генераторы**, принцип действия которых можно рассмотреть на примере плоской рамки, вращающейся в однородном магнитном поле (рисунок)

Пусть рамка вращается равномерно с угловой скоростью  $\omega - \text{const}$ .

Магнитный поток, сцепленный с рамкой площадью  $S$ , в любой момент времени  $t$  равен  $\Phi = BS \cos \alpha = BS \cos \omega t$ , где  $\alpha$  — угол поворота рамки в момент времени  $t$ . В момент вращения рамки в ней будет возникать переменная ЭДС индукции

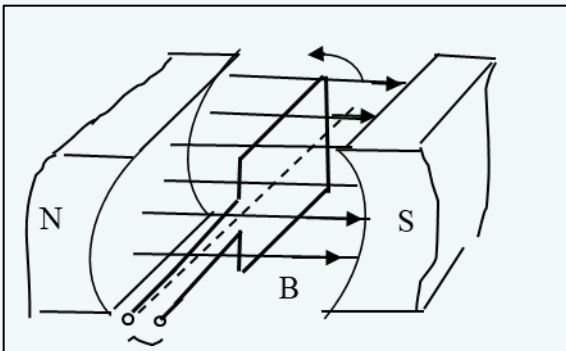
$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt} = BS\omega \sin \omega t$$

изменяющаяся по гармоническому закону. ЭДС максимальна при  $\sin \omega t = 1$

$$\varepsilon_{\max} = BS\omega$$

Если вращается  $N$  витков, соединенных последовательно, то максимальное значение ЭДС будет равно

$$\varepsilon_{\max} = NBS2\pi\nu$$



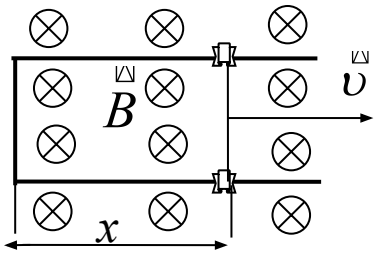
### Задача 3

В однородном магнитном поле подвижная сторона прямоугольной рамки длиной 20 см перемещается перпендикулярно линиям магнитной индукции со скоростью 5 м/с. Определить индукцию магнитного поля  $B$ , если возникающая в рамке ЭДС индукции равна 0,2 В.

Дано:  $l = 0,2$  м;  $v = 5$  м/с;  $\varepsilon_i = 0,2$  В

Найти:  $B$

Решение



При движении в магнитном поле подвижной стороны прямоугольной рамки поток  $\Phi$  вектора магнитной индукции сквозь рамку возрастает, что согласно закону Фарадея, приводит к возникновению ЭДС индукции

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

Поток вектора магнитной индукции, сцепленный с рамкой:  $\Phi = Blx$

После подстановки получим

$$\varepsilon = -Bl \frac{dx}{dt} = -blv$$



$$B = \frac{|\varepsilon_i|}{lv}$$

Ответ:  $B = 0,2$  Тл

$$B = \frac{|0,2|}{0,2 \cdot 5} = 0,2 \text{ Тл}$$

# Явление самоиндукции. Индуктивность

Электрический ток, текущий в любом контуре, создает пронизывающий этот контур магнитный поток  $\psi$ . При изменении тока меняется также поток. Контур оказывается в переменном магнитном потоке, и в контуре индуцируется ЭДС. Это явление называется *самоиндукцией*.

В соответствии с законом Био – Савара – Лапласа магнитная индукция  $B$  пропорциональна силе тока, вызвавшего поле. Отсюда вытекает, что ток  $I$  в контуре и создаваемый им полный магнитный поток через контур  $\psi$  пропорциональны друг другу:

$$\psi = LI$$

Коэффициент пропорциональности  $L$  называется *индуктивностью* контура. Индуктивность зависит от геометрии контура, а также от магнитных свойств окружающей среды.

Единицей индуктивности в СИ является генри (Гн). Индуктивность соленоида, имеющего  $N$  витков и площадь сечения  $S$ , может быть рассчитана по формуле:

$$L = \mu_0 \mu n^2 l \cdot S$$

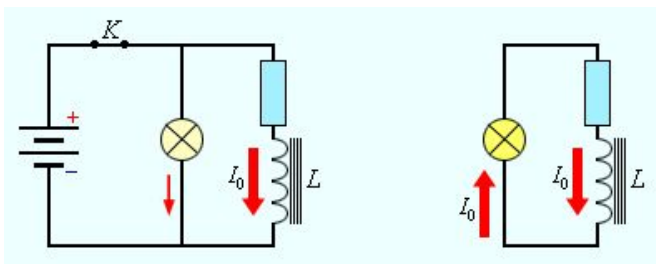
$$n = \frac{N}{l} - \text{число витков на единицу длины}$$

# ЭДС самоиндукции

Самоиндукция – частный случай явления электромагнитной индукции. Применяв закон Фарадея, получим формулу для ЭДС самоиндукции

$$\varepsilon_s = -\frac{d\psi}{dt} = -\frac{d(LI)}{dt} = -L\frac{dI}{dt} \longrightarrow \boxed{\varepsilon_s = -L\frac{dI}{dt}}$$

Знак ( - ) обусловлен правилом Ленца, согласно которому наличие индуктивности в контуре приводит к *замедлению изменения* тока в нем.



Магнитное поле обладает энергией. Подобно тому, как в заряженном конденсаторе имеется запас электрической энергии, в катушке, по виткам которой протекает ток, имеется запас магнитной энергии.

Если включить электрическую лампу параллельно катушке с большой индуктивностью в электрическую цепь постоянного тока, то *при размыкании ключа* наблюдается кратковременная вспышка лампы (рис.). Ток в цепи возникает под действием ЭДС самоиндукции. Источником энергии, выделяющейся при этом в электрической цепи, является магнитное поле катушки.

$$\boxed{W = \frac{LI^2}{2}}$$



#### Задача 4

Определить скорость изменения силы тока в обмотке электромагнита индуктивностью 3 Гн, если в ней возбуждается ЭДС самоиндукции 90 В.

Дано:  $L = 3$  Гн;  $\varepsilon_s = 90$  В

Найти:  $\frac{dI}{dt}$

Решение При изменении силы тока в обмотке двигателя в ней возникает ЭДС самоиндукции

Вычисления

$$\frac{dI}{dt} = \frac{90}{3} = 30 \text{ В}$$

$$\varepsilon_s = -L \frac{dI}{dt}$$



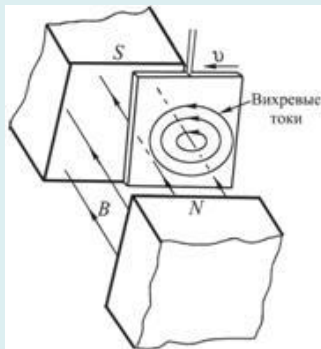
$$\frac{dI}{dt} = \frac{\varepsilon_s}{L}$$

Ответ:  $\frac{dI}{dt} = 30 \text{ В}$

# Токи Фуко (вихревые токи)

До сих пор мы рассматривали индукционные токи в линейных проводниках. Но *индукционные токи будут возникать и в толще сплошных проводников* при изменении в них потока вектора магнитной индукции. Они будут циркулировать в веществе проводника (напомним, что линии — замкнуты). Так как электрическое поле вихревое, то и токи называются вихревыми токами, или *токами Фуко*.

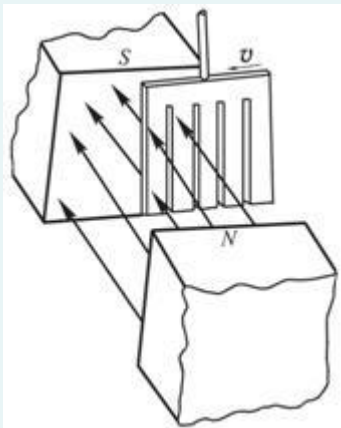
Если медную пластину отклонить от положения равновесия и отпустить так, чтобы она вошла со скоростью  $v$  в пространство между полосами магнита, то пластина практически остановится в момент ее вхождения в магнитное поле (рис.).



*Замедление движения связано с возбуждением в пластине вихревых токов, препятствующих изменению потока вектора магнитной индукции. Поскольку пластина обладает конечным сопротивлением, токи индукции постепенно затухают и пластина медленно движется в магнитном поле. Если электромагнит отключить, то медная пластина будет совершать обычные колебания, характерные для маятника.*

# Токи Фуко (вихревые токи)

Сила и расположение вихревых токов очень чувствительны к форме пластины. Если заменить сплошную медную пластину «гребенкой» – медной пластиной с пропилами, то вихревые токи в каждой части пластины возбуждаются меньшими потоками. Индукционные токи уменьшаются, уменьшается и торможение (рис.). Маятник в виде гребенки колеблется в магнитном поле почти без сопротивления. Этим опытом объясняется, почему сердечники электромагнитов, трансформаторов делают не из сплошного куска железа, а набранными из тонких пластин, изолированных друг от друга. В результате уменьшаются токи Фуко и выделяемое ими тепло.



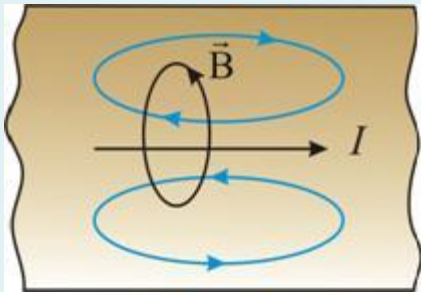
Тормозящее действие тока Фуко используется для создания магнитных успокоителей – демпферов.

Токи Фуко применяются в электрометаллургии для плавки металлов. Металл помещают в переменное магнитное поле, создаваемое током частотой 500 – 2000 Гц.

# Скин - эффект

Скин-эффект - это физическое явление, заключающееся в неоднородном распределении плотности переменного тока по сечению проводника: она достигает наибольшего значения у его поверхности и уменьшается с глубиной. При очень больших частотах ток практически существует только в тонком поверхностном слое.

Для качественного объяснения "вытеснения" переменного тока к поверхности проводника при скин-эффекте воспользуемся рисунком, на котором изображен участок цилиндрического проводника. Рассмотрим момент времени, когда ток  $I$  возрастает. Вместе с ним возрастает и создаваемое им магнитное поле с индукцией  $\vec{B}$



Ток как бы вытесняется на поверхность провода, при этом вихревые токи по оси проводника текут против направления основного тока, а на поверхности – в том же направлении. Это явление называется скин-эффектом (от англ. *skin* – кожа, оболочка). Впервые это явление описано в 1885–1886 гг. английским физиком О. Хевисайдом,

# Скин - эффект

Плотность тока убывает от поверхности к оси провода примерно по экспоненциальному закону.

При частоте 50 Гц – ток практически равномерно распределен по объему проводов, исключая очень толстые кабели. Но при высокочастотных колебаниях  $\nu = 100$  МГц глубина проникновения  $r \sim 7 \cdot 10^{-3}$  мм, и ток почти целиком течет по поверхности провода. Поэтому проводники в устройствах СВЧ делают не сплошными, а полыми (например, телевизионные антенны в виде полых трубок).

С целью уменьшения потерь поверхность высокочастотных контуров серебрят. Провода для переменных токов высокой частоты, учитывая скин-эффект, сплетают из большого числа тонких проводящих нитей, изолированных друг от друга эмалевым покрытием – *литцендратом*.

Если сплошные проводники нагревать токами высокой частоты, то в результате скин-эффекты происходит нагревание только их поверхностного слоя. На этом основан метод поверхностной закалки металлов. Меняя частоту поля, он позволяет производить закалку на любой требуемой глубине.

**Спасибо за внимание**