

# Явление электромагнитной индукции

Электрический ток создает вокруг  
себя магнитное поле.  
Следовательно, возможно обратное  
явление.

## Явление электромагнитной индукции

### **Явление электромагнитной индукции**

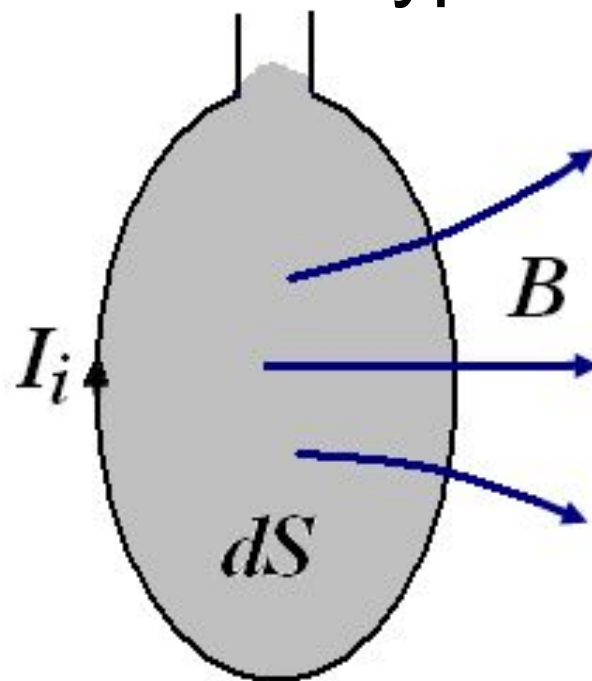
– в замкнутом проводящем контуре при изменении потока магнитной индукции

$d\Phi_B = \int \vec{B} d\vec{S}$ , охватываемого этим контуром, возникает

электрический ток,

называемый

**индукционным  $I_i$ .**



## Явление электромагнитной индукции

- **Закон электромагнитной индукции Фарадея:** так как в контуре возникает индукционный ток, следовательно, в цепи есть э.д.с. индукции, которая определяется только скоростью изменения магнитного поля

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi_B}{dt}.$$

Знак минус в уравнении  $\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$  отражает **правило Ленца** :

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

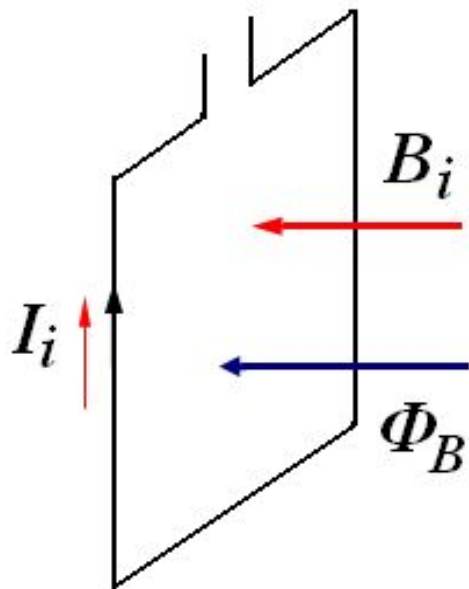
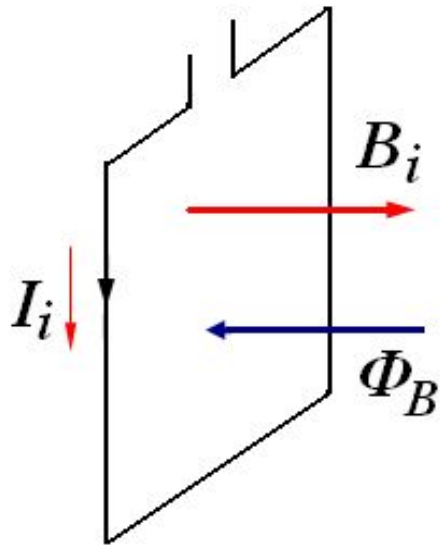
$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

• **Увеличение потока**  $\frac{d\Phi_B}{dt} > 0$

вызывает  $\mathcal{E}_i < 0$ , т.е. поле индукционного поля  $\mathbf{B}_i$  направлено навстречу внешнему полю, поток которого  $\Phi_B$ .

• **Уменьшение потока**  $\frac{d\Phi_B}{dt} < 0$

вызывает,  $\mathcal{E}_i > 0$ , т.е. поле индукционного поля  $\mathbf{B}_i$  совпадает с направлением внешнего поля, поток которого  $\Phi_B$ .



Закон Фарадея универсален, так как не зависит от способа изменения магнитного поля.

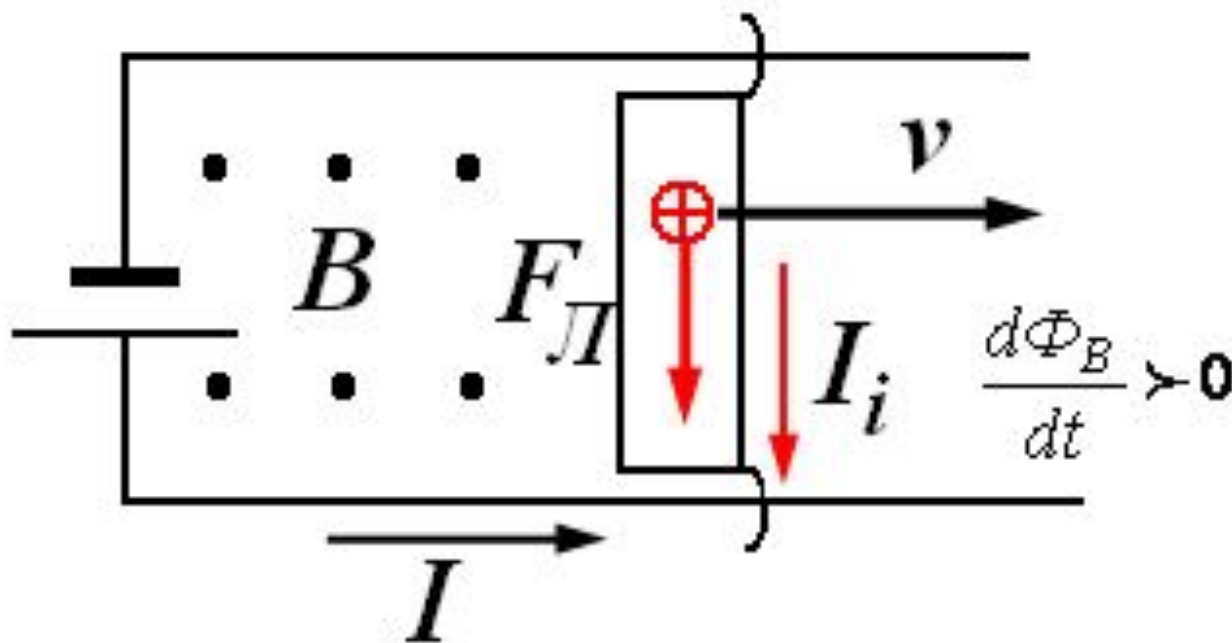
В системе СИ размерность э.д.с. индукции:  $[E_i] = [Вб/с] = В$ .

$$\left[ \frac{Вб}{с} \right] = \left[ \frac{Тл \cdot м^2}{с} \right] = \left[ \frac{Н \cdot м \cdot м^2}{А \cdot м^2 \cdot с} \right] = \left[ \frac{Н \cdot м}{А \cdot с} \right] = \left[ \frac{Дж}{Кл} \right] = [В].$$

Поток магнитной индукции можно менять следующими способами:

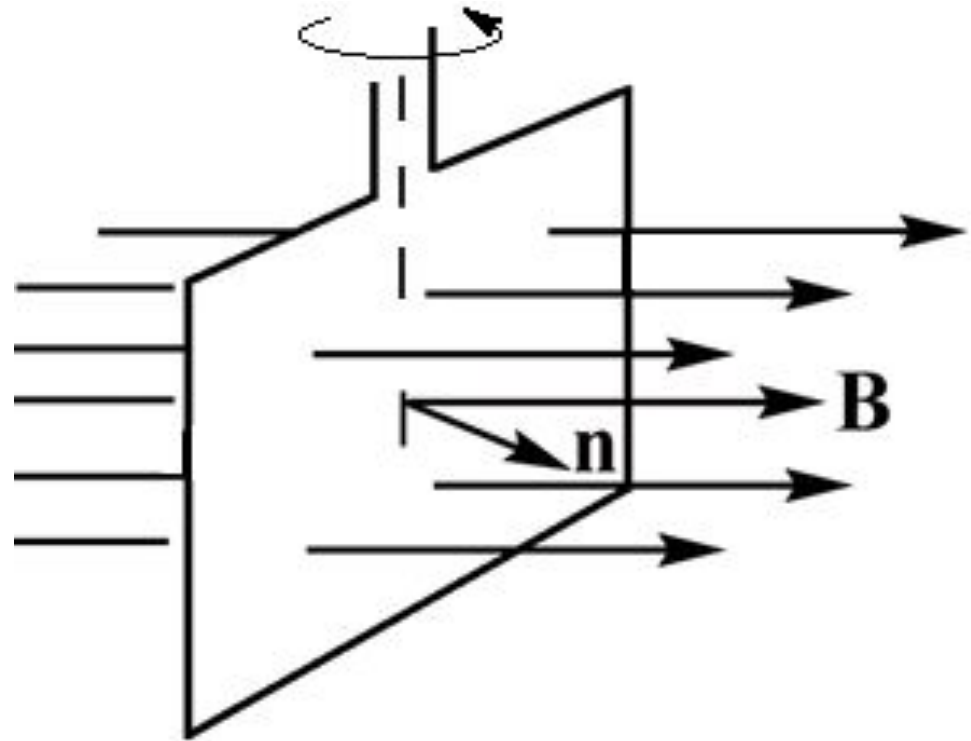
1. Изменять площадь рамки  $S$ .

(На электрические заряды в проводнике действует сила Лоренца)



## 2. Вращать рамку.

(На электрические заряды в проводнике действует сила Лоренца)





3. Использовать **переменное магнитное поле**. Переменное магнитное поле возбуждает в пространстве переменное электрическое поле, которое и является причиной индукционного тока в неподвижном проводнике (гипотеза Максвелла).

$$\mathcal{E}_i = \oint_L \vec{E}_{Bi} \cdot d\vec{l} = - \frac{d\Phi_B}{dt}.$$

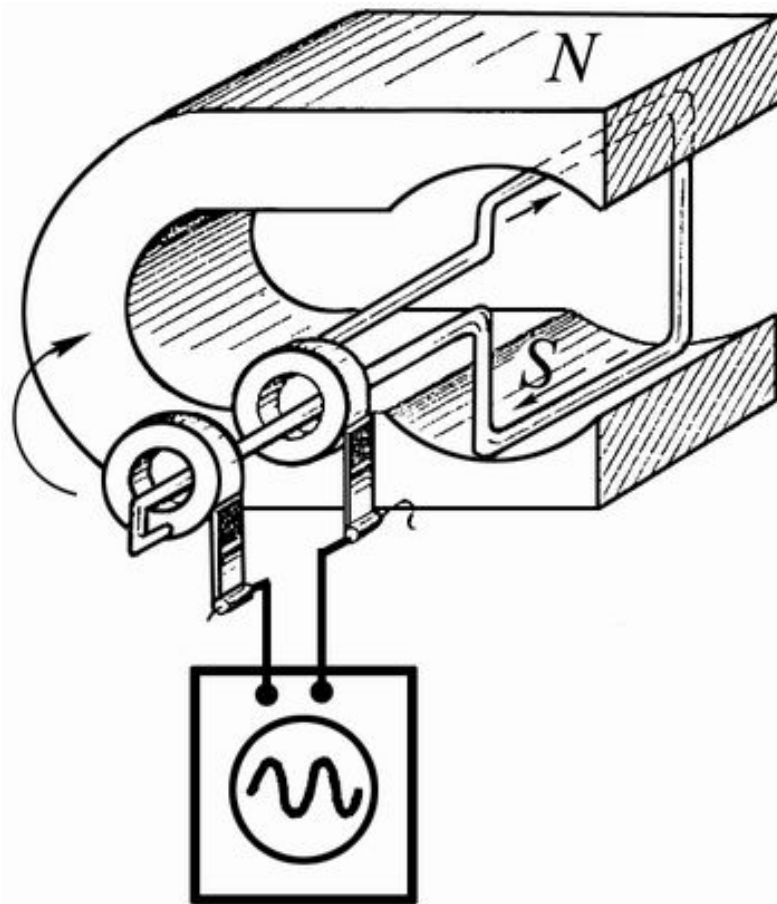
Циркуляция вектора напряженности  $\vec{E}_{Bi}$  индуцированного электрического поля по неподвижному контуру  $L$  проводника равна э.д.с. электромагнитной индукции  $\mathcal{E}_i$ .

Это явление положено в основу работы  
**генераторов переменного тока,**

в которых в однородном магнитном поле ( $\mathbf{B} = const$ ) равномерно (с угловой скоростью  $\omega = const$ ) вращается рамка

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi_B}{dt} = \underbrace{BS\omega}_{\mathcal{E}_{\max}} \sin \omega t,$$

$S$  – площадь рамки.



# Процесс превращения механической энергии в электрическую обратим

- если по рамке, помещенной в магнитное поле, пропускать электрический ток, то на рамку действует вращающий момент, и она начинает поворачиваться – ***электродвигатель.***

## Вихревое электрическое поле

Сила Лоренца ( $F_L = q[E + v \times B]$ ) на неподвижные заряды не действует.

*Для объяснения явления электромагнитной индукции необходимо считать, что **переменное магнитное поле** вызывает появление **электрического поля – вихревого электрического поля**, под действием которого и возникает индукционный ток в замкнутом проводнике.*

## Вихревое электрическое поле

э.д.с. индукции:  $\mathcal{E}_i = \oint_L \vec{E}_{стор} d\vec{l}$ .

Результирующее

поле:  $E = E_{кул} + E_{стор}, \quad E_{стор} = E - E_{кул},$   
 $E_{кул}$  – напряженность электростатического поля,

$E_{стор}$  – напряженность поля сторонних сил.

$$\mathcal{E}_i = \oint_L (\vec{E} - \vec{E}_{кул}) d\vec{l} = \oint_L \vec{E} d\vec{l} - \underbrace{\oint_L \vec{E}_{кул} d\vec{l}}_0.$$

$$\mathcal{E}_i = \oint_L \vec{E} d\vec{l} = -\frac{\partial \Phi_B}{\partial t} \neq 0.$$



## Вихревое электрическое поле

В уравнении 
$$\mathbf{E}_i = -\frac{\partial \Phi_B}{\partial t}$$
 берётся частная производная по времени, так как рассматривается только возникновение э. д. с. индукции  $E_i$  вследствие зависимости магнитной индукции от времени (т.е. имеем неподвижный контур).

$$\oint_L \mathbf{E} d\mathbf{l} \neq 0,$$

следовательно, электрическое поле, возбуждаемое переменным магнитным полем – **вихревое**.

# Отличия вихревого электрического поля от электростатического:

1. Силовые линии вихревого электрического поля – **замкнутые**.
2. **Работа** по перемещению единичного положительного точечного заряда в вихревом электрическом поле (циркуляция вектора  $\mathbf{E}$ ) не равна нулю, а **равна э.д.с. индукции**  $E_i$ .

# Закон электромагнитной индукции в дифференциальной форме

Формула Стокса:  $\oint_L \vec{A} d\vec{l} = \int_S \text{rot} \vec{A} d\vec{S}.$

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = -\frac{\partial \Phi_B}{\partial t} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} d\vec{S}.$$

Контур не изменяет форму, следовательно, операции дифференцирования и интегрирования можно поменять местами и перейти к частной производной:

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}. \quad \Rightarrow \quad \oint_L \vec{E} d\vec{l} = \int_S \text{rot} \vec{E} d\vec{S} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}.$$

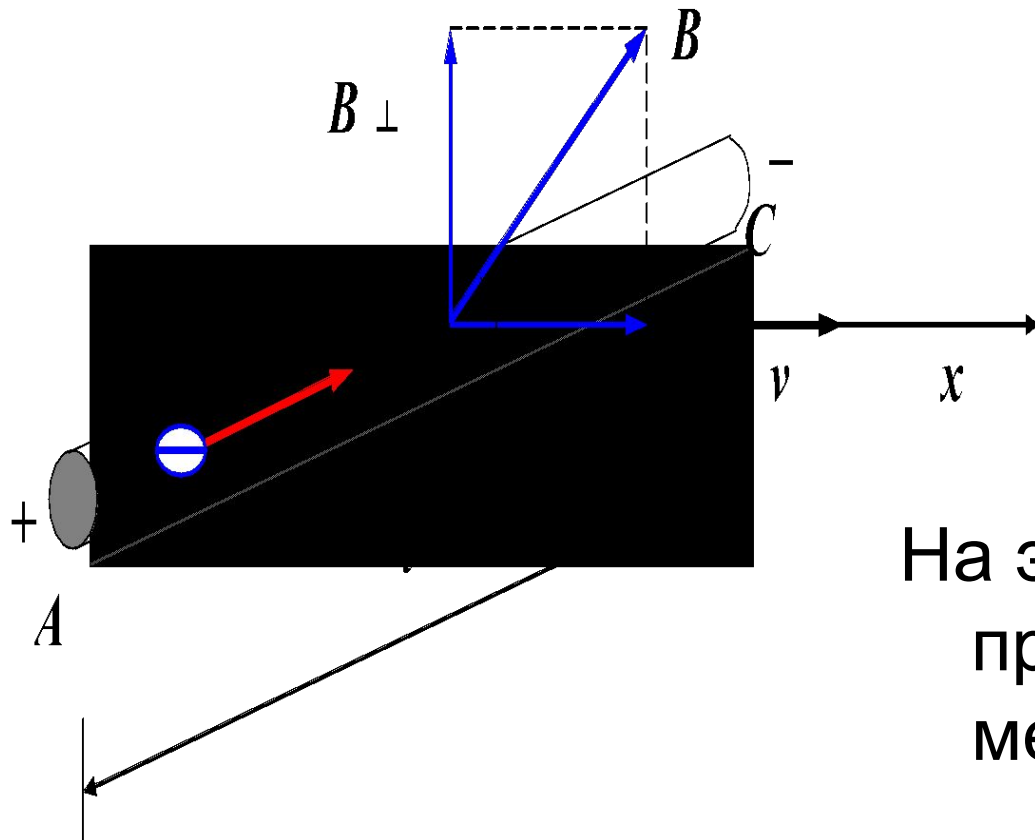


## Закон электромагнитной индукции в дифференциальной форме

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = \int_S \operatorname{rot} \vec{E} d\vec{S} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}.$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}.$$

# Электронный механизм возникновения э.д.с. индукции

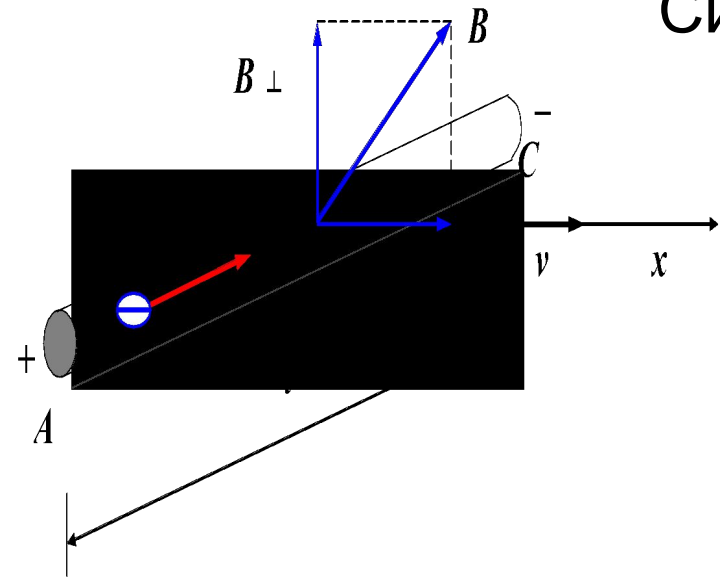


Отрезок проводника движется в постоянном магнитном поле индукцией  $B = \text{const.}$

На электроны проводимости металла действует

$$F_{\text{Л}} = qvB \sin \alpha.$$

## Электронный механизм возникновения э.д.с. индукции



Сила, действующая на электрон, отлична от нуля только в самом начале движения проводника, так как упорядоченное движение электронов вдоль проводника от **A** к **C** вызывает возникновение в проводнике электростатического поля, препятствующего дальнейшему перераспределению электронов.

$$F_{\text{Л}} = F_{\text{эл.стат.}}; \quad qvB \sin \alpha = qE$$

$$\Rightarrow E = vB \sin \alpha.$$

**Электронный механизм возникновения э.д.с.  
индукции**

$$E = vB \sin \alpha.$$

$$\Delta\varphi = El = vBl \sin \alpha = vB_{\perp} l.$$

$$\varphi_A - \varphi_C = \Delta\varphi = -\mathbf{E}_{\dot{\uparrow}}; \quad v = \frac{dx}{dt}; \quad ldx = dS.$$

$$\mathbf{E}_{\dot{\uparrow}} = -B_{\perp} \frac{ldx}{dt} = -\frac{BdS}{dt} = -\frac{d\Phi_B}{dt}.$$

$d\Phi_B$  – поток через поверхность,  
прочерчиваемую проводником при движении.

# Электромагнитная индукция в технике.

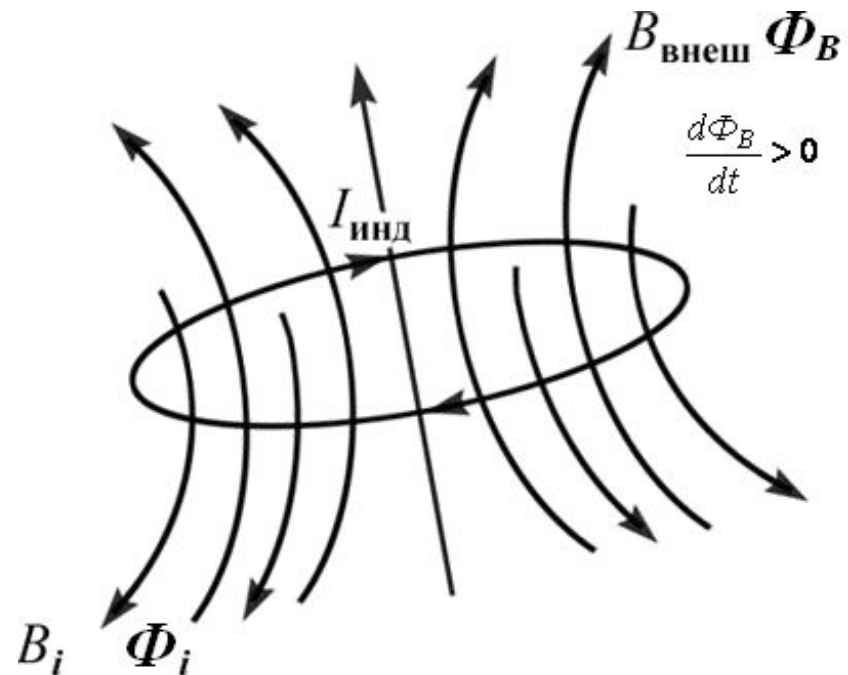
## Токи Фуко (вихревые токи)

- ***Токи Фуко (вихревые токи)*** – индукционные токи, возникающие в массивных сплошных проводниках, помещенных в переменное магнитное поле.
- Массивные проводники – поперечные размеры, которых соизмеримы с длиной проводника.

- В отличие от линейных проводников в массивных проводниках токи (токи Фуко) замкнуты в объёме, поэтому они называются **вихревыми**.

Они подчиняются правилу Ленца, т.е. их магнитное поле направлено

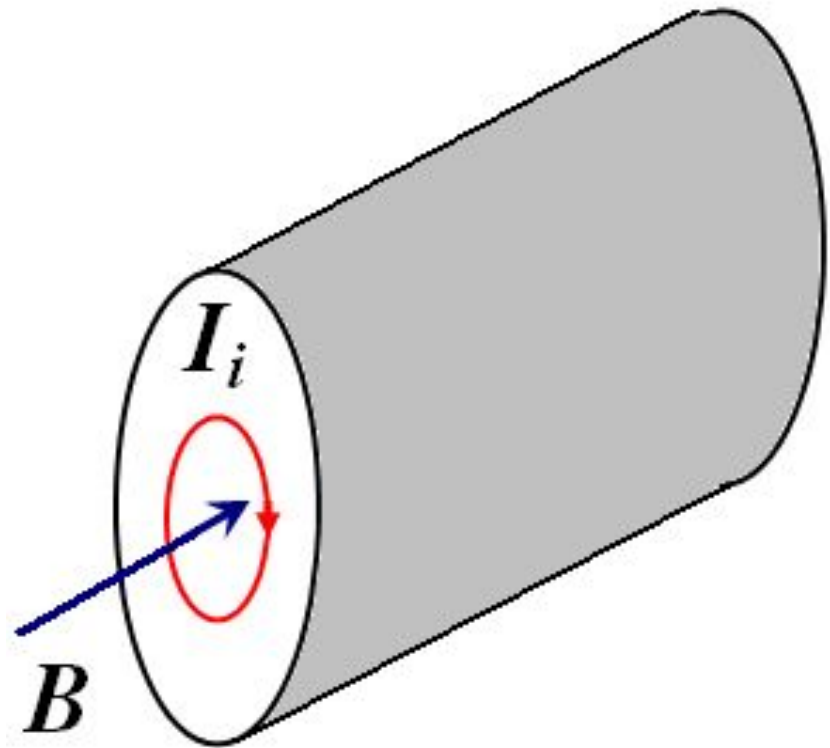
таким образом, чтобы противодействовать изменению магнитного потока, индуцирующего вихревые токи.



# Применение

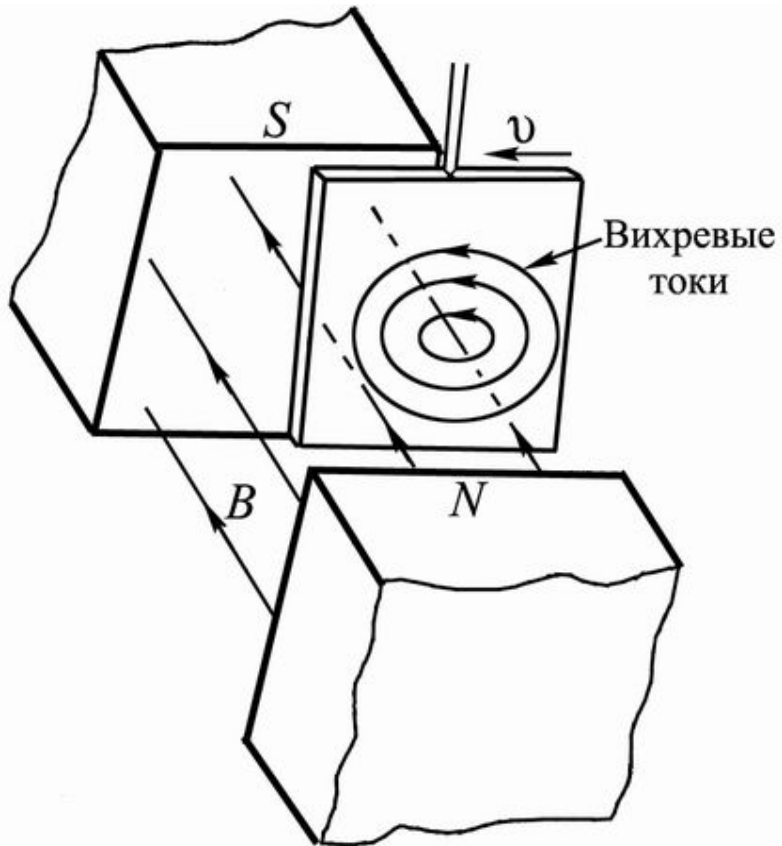
1. Нагрев – индукционные печи.

$$I_i = \frac{E_1}{R} = - \frac{d\Phi}{dt} \cdot \frac{S}{\rho l}.$$



# Применение

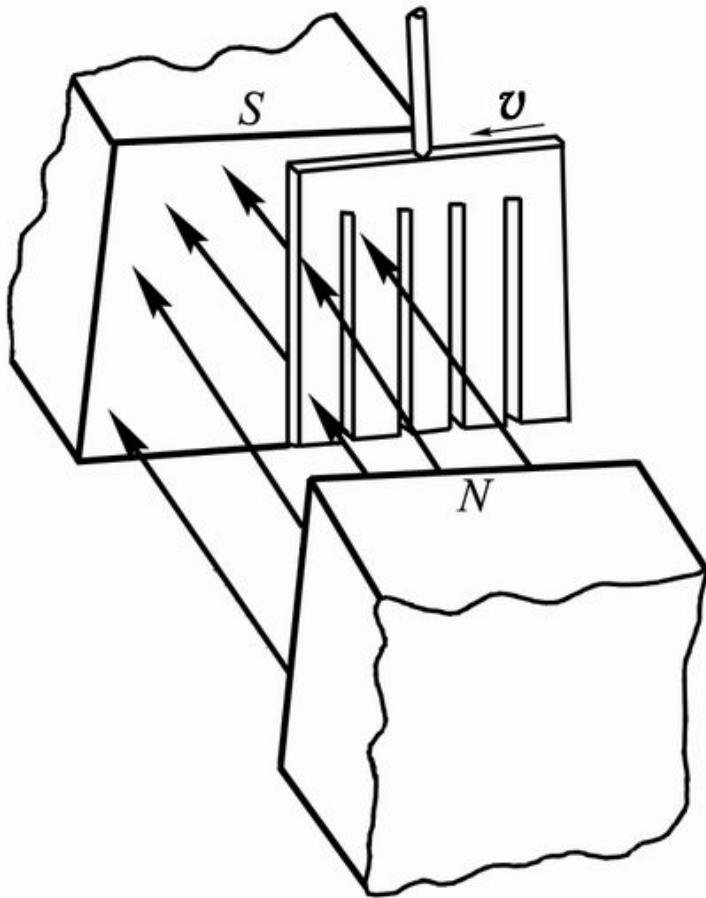
## 2. Торможение подвижных частей – электромагнитные успокоители.



Токи Фуко, возбуждаемые в массивных проводниках при движении в магнитном поле, препятствуют изменению потока вектора магнитной индукции. Происходит замедление движения – торможение пластины.



# Применение



Движение медной гребенки в магнитном поле – эффект торможения вихревыми токами за счет уменьшения потоков  $\Phi$  в каждой части пластины уменьшается. Вихревые токи в каждой части пластины возбуждаются меньшими потоками. Индукционные токи уменьшаются, уменьшается и торможение

Для уменьшения нагрева деталей, находящихся в переменном магнитном поле, токами Фуко, эти детали (сердечники трансформаторов, якоря генераторов)

1) делают из тонких пластин, отделенных друг от друга слоями изолятора,

2) устанавливают так, чтобы вихревые токи были направлены поперек пластин.

