

Явление электромагнитной индукции

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

Явление электромагнитной индукции

Явление электромагнитной индукции

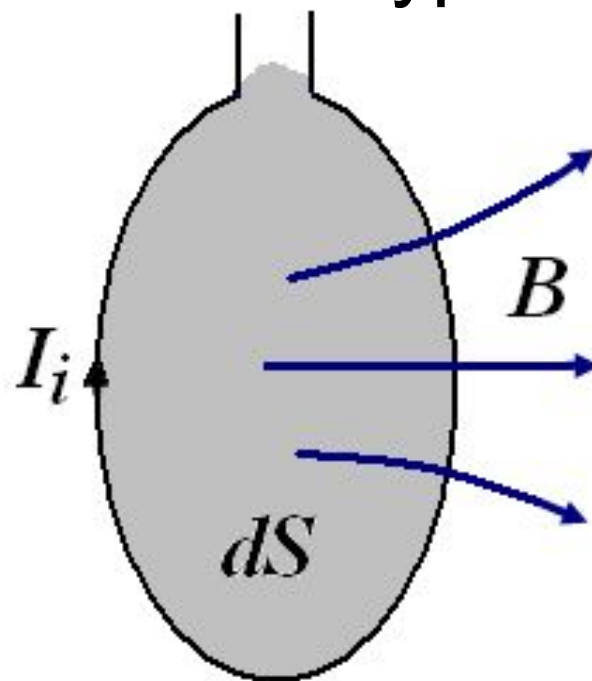
– в замкнутом проводящем контуре при изменении потока магнитной индукции

$d\Phi_B = \int \vec{B} d\vec{S}$, 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.

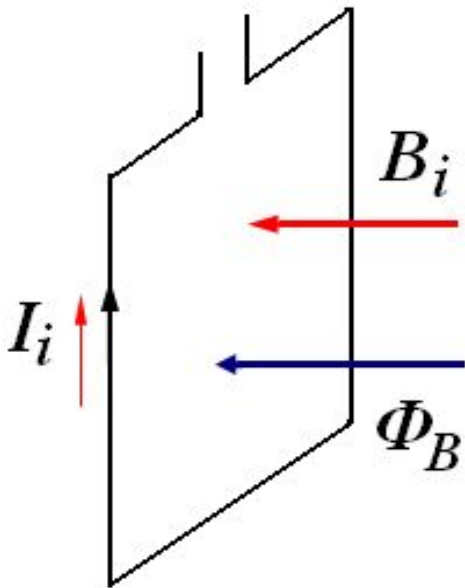
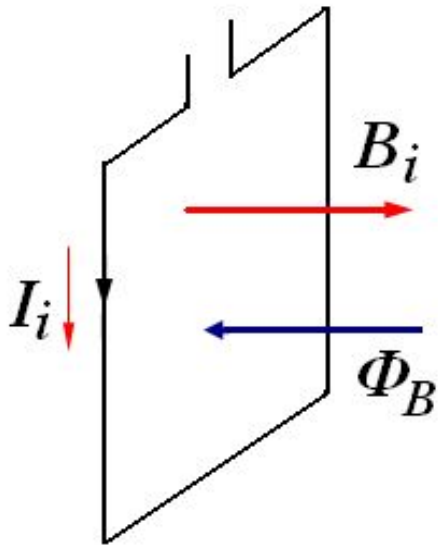
$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

• **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 Φ_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 Φ_B .



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

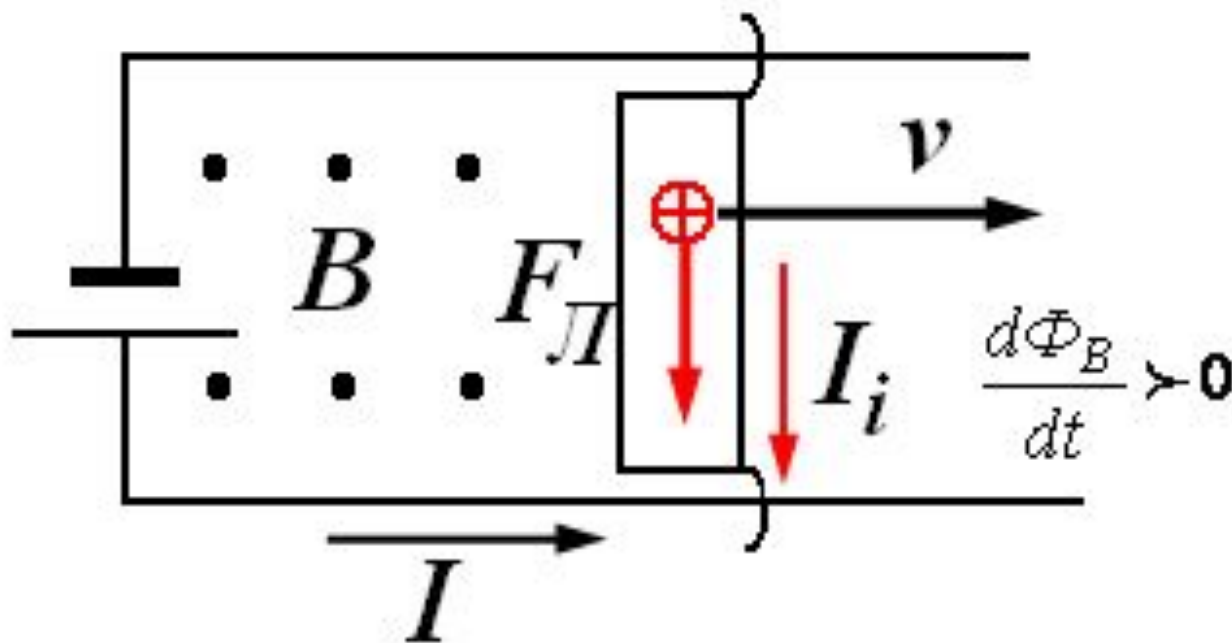
В системе СИ размерность э.д.с. индукции: $[E_i] = [Вб/с] = В$.

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

Поток магнитной индукции можно менять следующими способами:

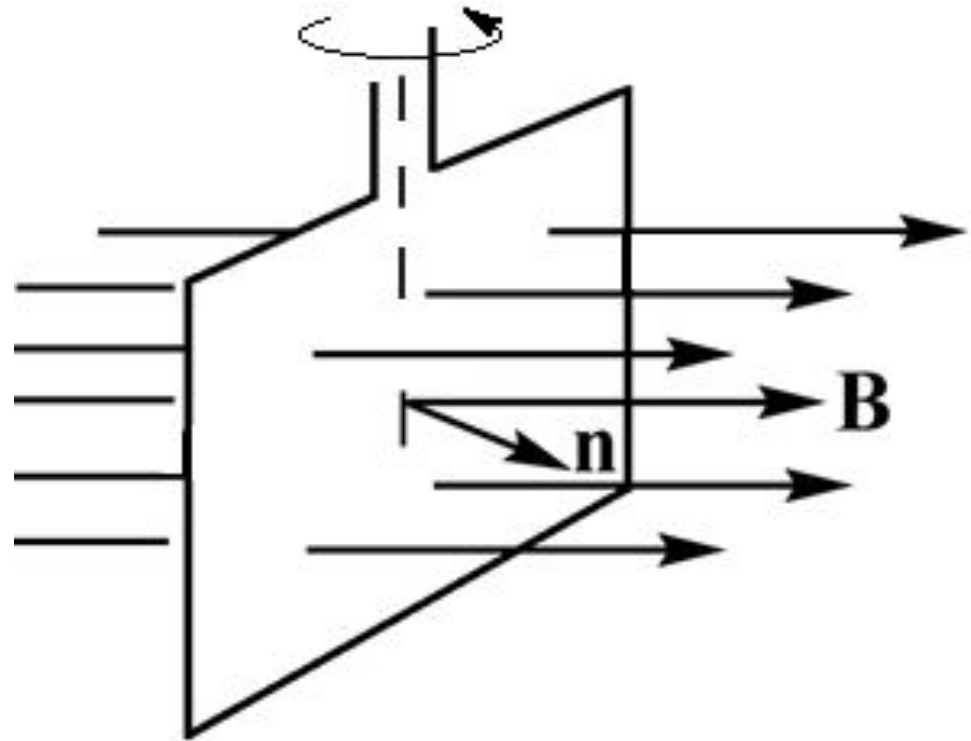
1. Изменять площадь рамки S .

(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).

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

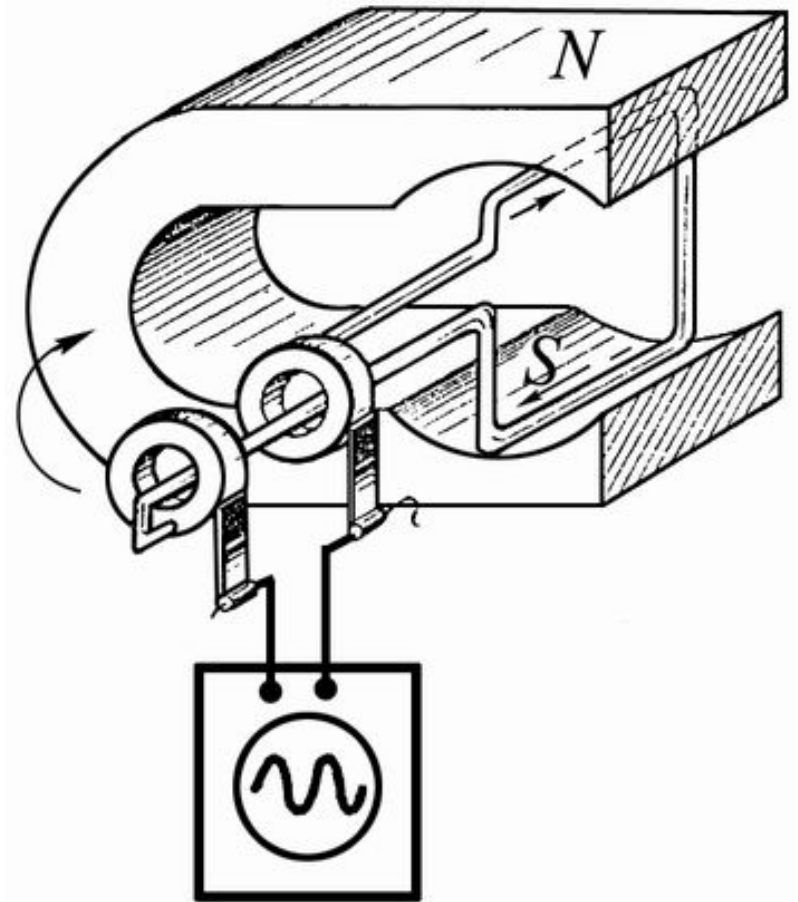
Циркуляция вектора напряженности \vec{E}_{Bi} индуцированного электрического поля по неподвижному контуру L проводника равна э.д.с. электромагнитной индукции \mathcal{E}_i .

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 ($F_L = q[E, v]$) 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: $\mathcal{E}_i = \oint_L \vec{E}_{стор} d\vec{l}$.

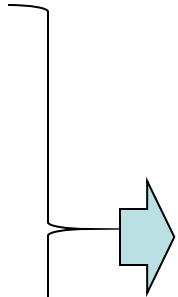
Результирующее

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:

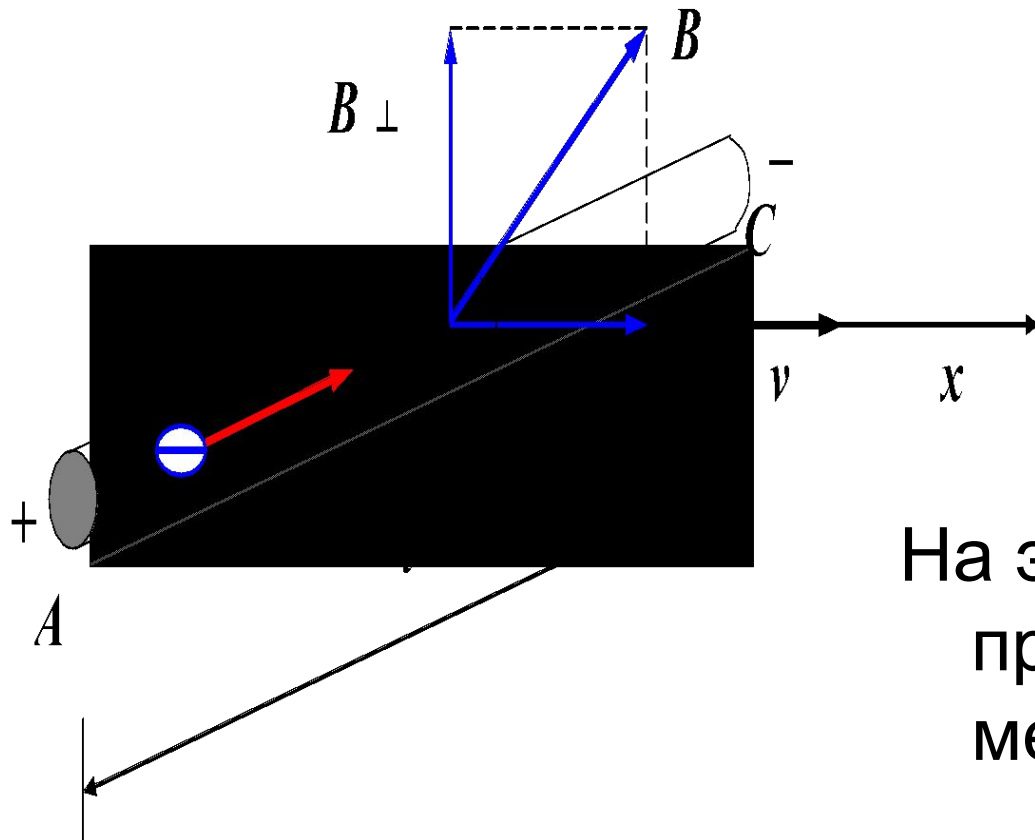
$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}. \quad \Rightarrow \quad \oint_L \vec{E} d\vec{l} = \int_S \text{rot} \vec{E} d\vec{S} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}.$$

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

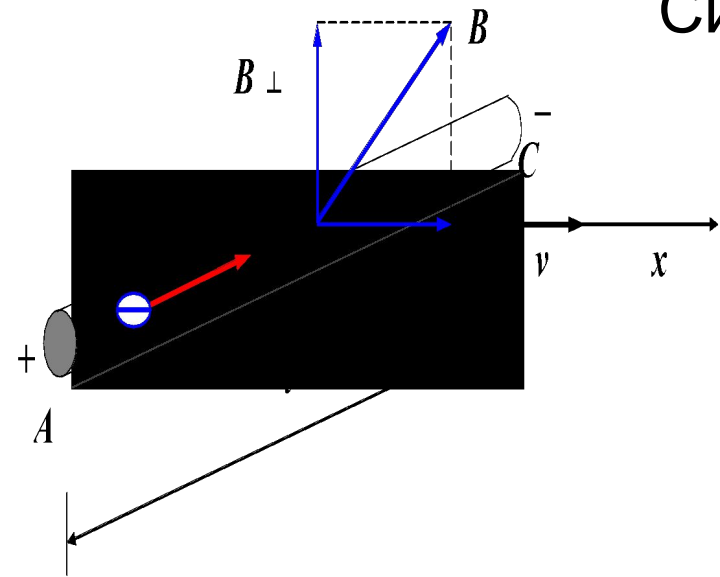


Отрезок проводника движется в постоянном магнитном поле индукцией $B = \text{const}$.

На электроны проводимости металла действует

$$F_{Л} = qvB \sin \alpha.$$

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 **А** к **С** 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.

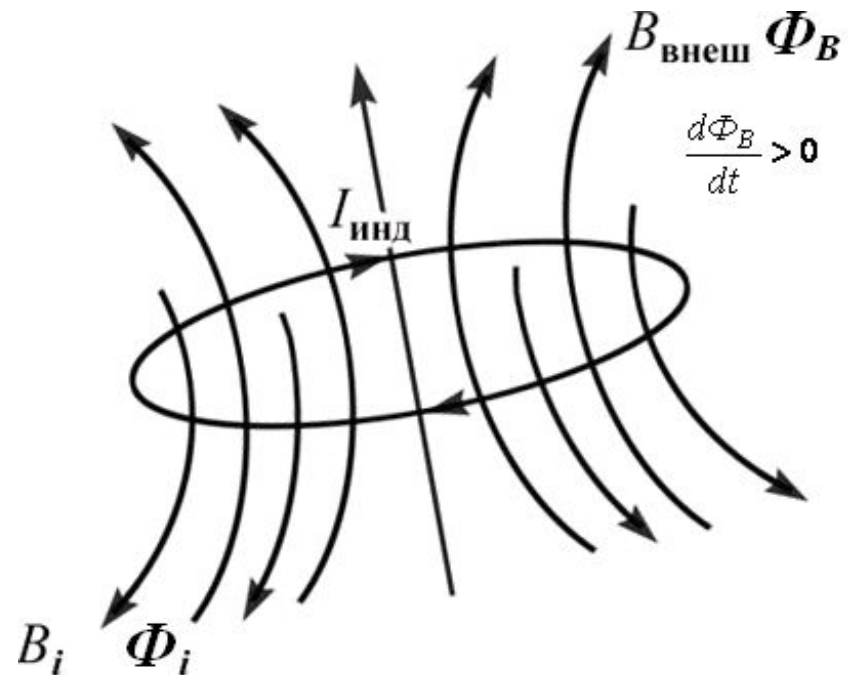
Электромагнитная индукция в технике. Токи Фуко (вихревые токи)

- ***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

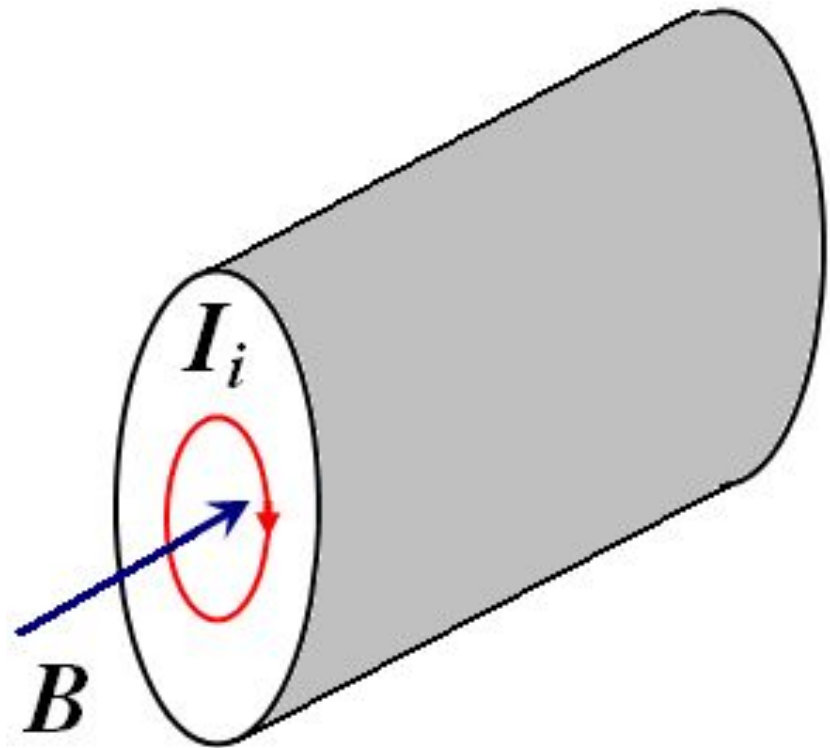
таким образом, чтобы противодействовать изменению магнитного потока, индуцирующего вихревые токи.



Применение

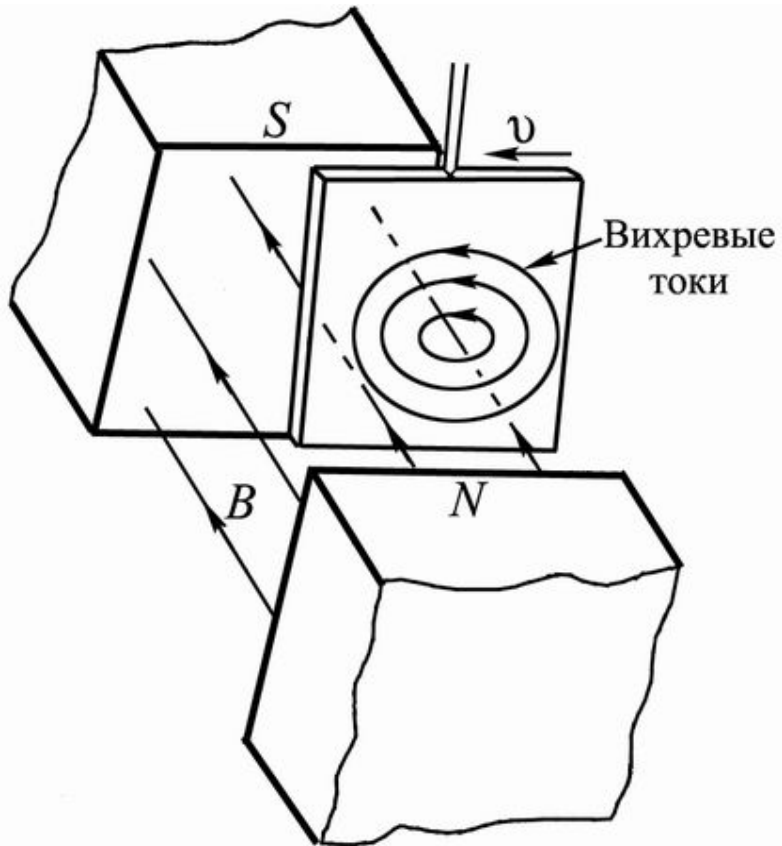
1. Нагрев – индукционные печи.

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



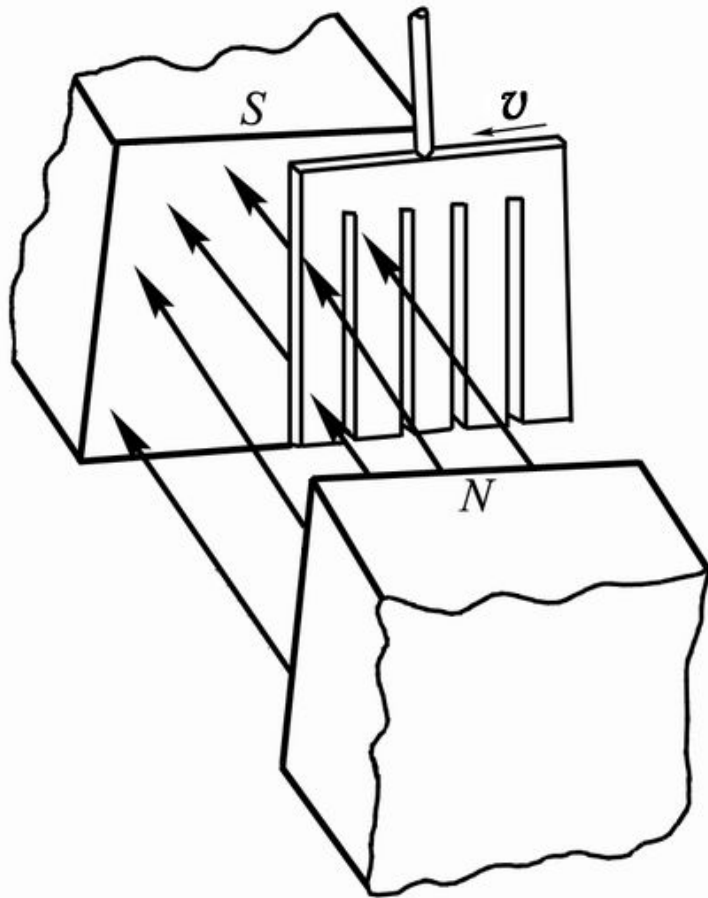
Применение

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 Φ 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.

