
ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

1. ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ (ЭМИ)



В 1831 г. М. Фарадей обнаружил, что в замкнутом проводящем контуре возникает (индуцируется) электрический ток при изменении потока магнитной индукции (Φ) через поверхность, ограниченную этим контуром.

Это явление называют электромагнитной индукцией, а возникающий ток – индукционным



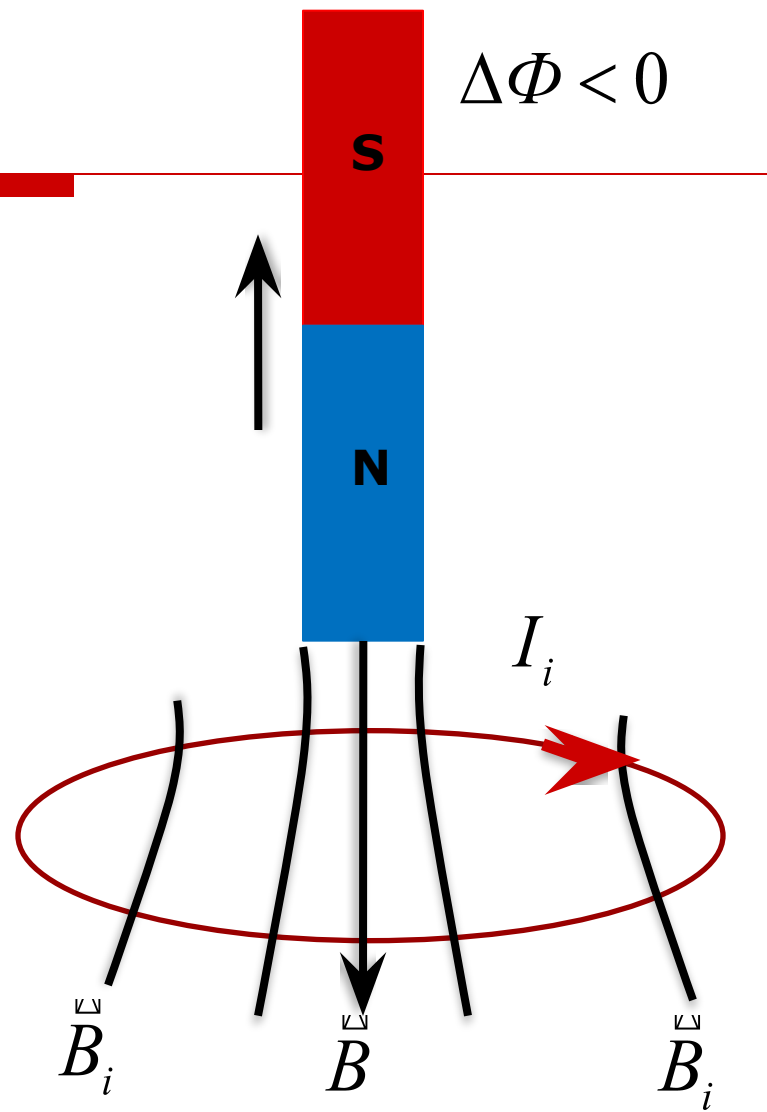
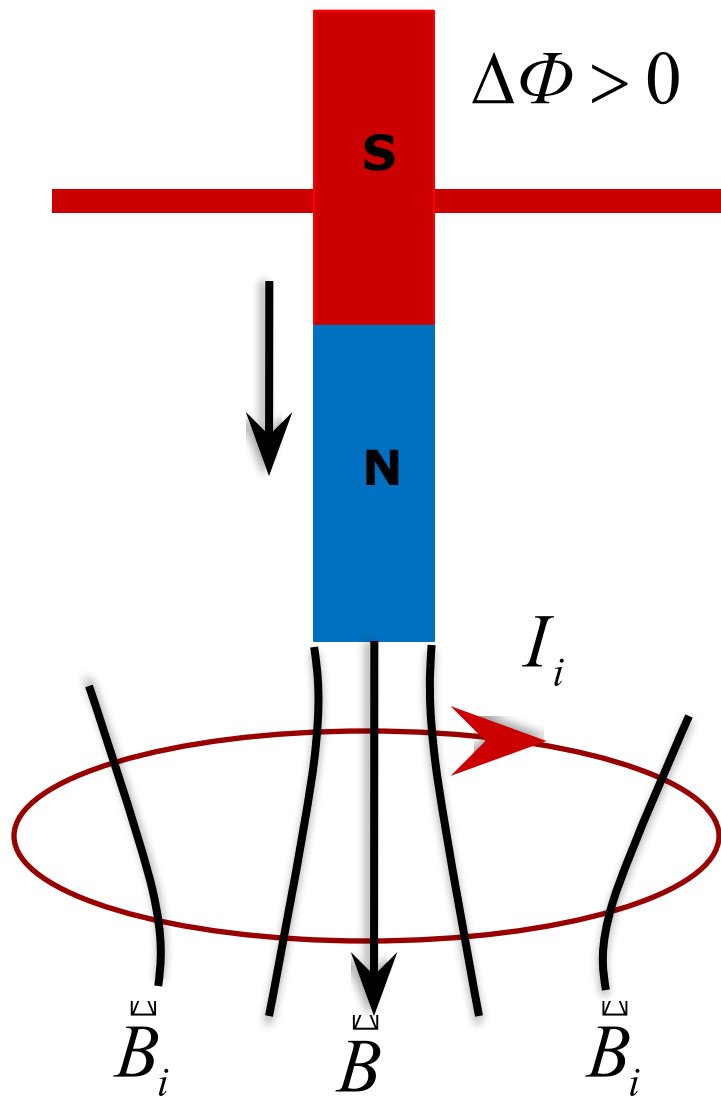
Майкл Фарадей
1791 – 1867
английский физик
и химик

2. ПРАВИЛО ЛЕНЦА



Эмилий Христианович Ленц
1804 – 1865
русский физик и электротехник

Возникающий в контуре ток (индукционный) всегда препятствует **причине** его вызывающей



3. ЗАКОН ФАРАДЕЯ ДЛЯ ЭМИ

- величина ЭДС, индуцируемой в контуре, равна **скорости** изменения потока магнитной индукции.

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

- для контура

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

- для катушки
(соленоида)

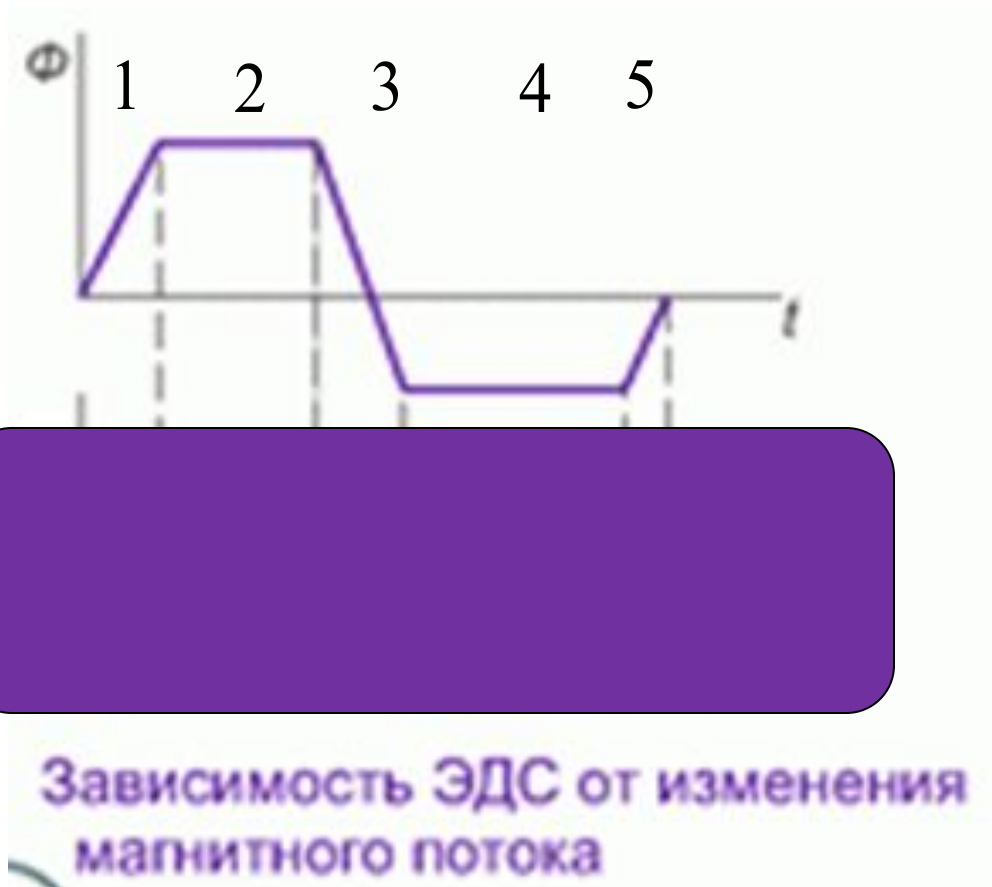
или

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

- здесь Ψ - **полный магнитный
поток** или **потокосцепление**

Знак «минус» в законе Фарадея отражает
правило Ленца!!!

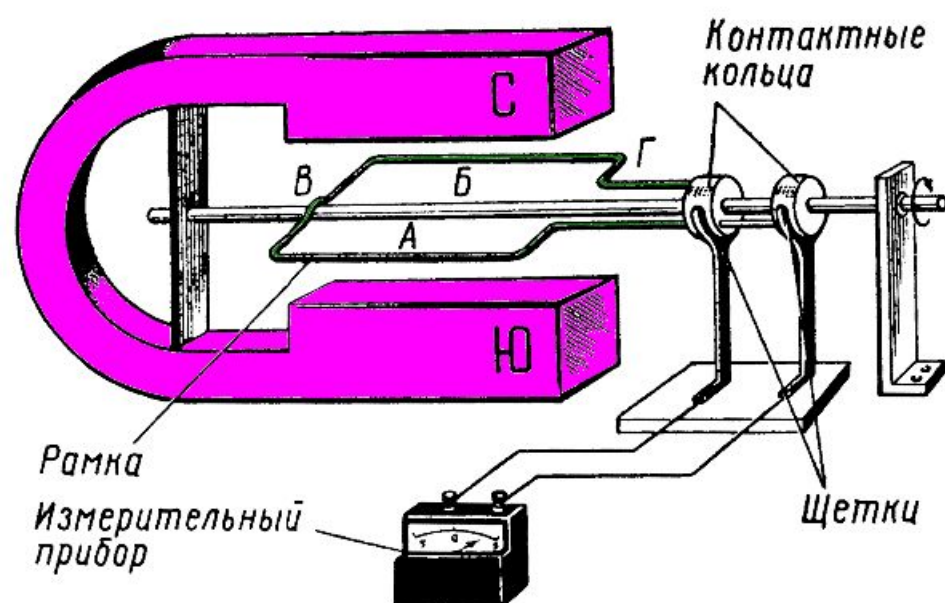
ВОПРОС: на каком участке ЭДС индукции максимальна? равна нулю? Почему?



Задачи (модели)

6.(B.11.99) В однородном магнитном поле, индукция которого $B=0,1$ Тл, равномерно вращается рамка, состоящая из $N=100$ витков проволоки. Частота вращения рамки $\nu = 5 \text{ с}^{-1}$, площадь рамки $S= 0,01 \text{ м}^2$. Ось вращения лежит в плоскости рамки, проходит через её центр и перпендикулярна к направлению магнитного поля. Найти максимальную ЭДС индукции $\mathcal{E}_{\text{max}}$ во вращающейся рамке.

Ответ: $\mathcal{E}_{\text{max}}=3,14 \text{ В}$.



4.(B.11.96) В магнитном поле, индукция которого $B=0,05$ Тл, вращается стержень длиной $l=1$ м с угловой скоростью $\omega=20$ рад/с. Ось вращения проходит через конец стержня и параллельна магнитному полю. Найти ЭДС индукции $\mathcal{E}$, возникающую на концах стержня.

Ответ: $\mathcal{E} = 0,5$ В.

2.(В.11.94) Катушка диаметром $D=10$ см, состоящая из $N=500$ витков проволоки, находится в магнитном поле, силовые линии которого перпендикулярны плоскости витков катушки. Найти среднюю ЭДС индукции $\mathcal{E}_{\text{ср}}$, возникающую в этой катушке, если индукция магнитного поля B увеличивается в течение времени $t=0,1$ с от 0 до 2 Тл.

Ответ: $\mathcal{E}_{\text{ср}} = 78,4$ В.

2.(М.4.52) Квадратная рамка со стороной $a=20$ см расположена в однородном магнитном поле так, что нормаль к рамке образует угол $\alpha=60^\circ$ с направлением поля. Магнитное поле изменяется с течением времени по закону $B=B_0\cos\omega t$, где $B_0=0,2$ Тл и $\omega=300$ с⁻¹. Определить величину ЭДС индукции $\mathcal{E}$ в рамке для момента времени $t=4$ с.

4. Формальные причины явления ЭМИ

Поток $\vec{B}$

$$\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{S} = \int_S B dS \cos \alpha$$

Следствие

Способы изменения магнитного потока

или

$$d\Phi > 0$$

$$d\Phi < 0$$

ЭМИ

$\vec{B} = const$

$$\frac{dS}{dt}$$

$$\frac{d\alpha}{dt}$$



Контур или отдельные его части перемещается в *постоянном магнитном поле* (вращение контура и (или) проводника, поступательное движение проводника).

$\vec{B} \neq const$

$$\vec{B} = \vec{B}(t)$$

Неподвижный контур в *переменном магнитном поле*.

Вспомним: что такое ЭДС ?!

Необходимое условие
существования
постоянного тока –
наличие ЭДС



ЭДС - это работа,
совершаемая
сторонними
силами...

Сторонние силы – силы
неэлектростатического
происхождения. Работа этих сил
по перемещению заряда A^*

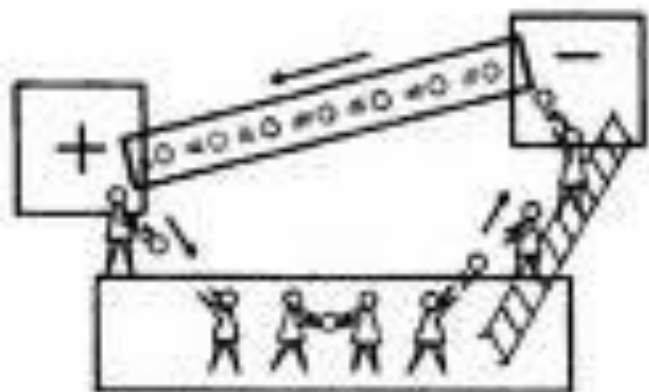
$\oint E^*$ - напряженность поля сторонних сил

(1) - определение ЭДС

$$A_{12}^* = \int_1^2 \vec{F}^* \cdot d\vec{l} = q \int_1^2 \vec{E}^* \cdot d\vec{l}$$

$$\varepsilon_{12} = \frac{A_{12}^*}{q} = \int_1^2 \vec{E}^* \cdot d\vec{l}$$

(1)



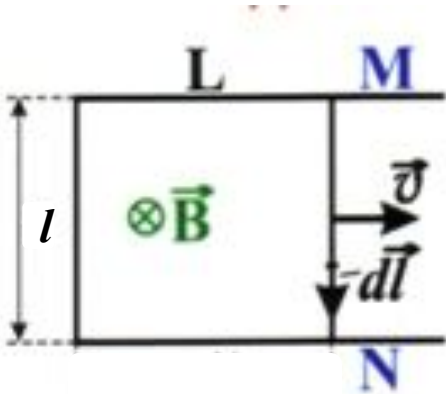
сторонние силы

5. Истинные причины явления ЭМИ.

5.1 Действие магнитной силы

$$\vec{B} = const \quad \vec{v} = const$$

MN – подвижная сторона контура L



$$\vec{F} = q[\vec{v}\vec{B}]$$

-магнитная сила, выполняет роль сторонней силы

$$\vec{E}^* = \frac{\vec{F}}{q} = [\vec{v}\vec{B}] \text{ -напряженность поля сторонней силы}$$

$\vec{dl}$



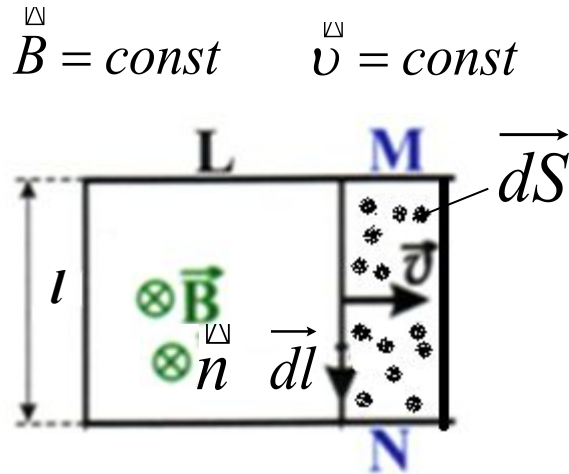
Используя определение $\mathcal{E}_i$ получим

$$\mathcal{E}_i = \int_M^N \vec{E}^* \cdot d\vec{l} = \int_M^N [\vec{v}\vec{B}] \cdot d\vec{l} = ([\vec{v}\vec{B}]l)$$

$$\mathcal{E}_i = ([\vec{v}\vec{B}]l) = ([l\vec{v}]\vec{B})$$

5. Истинные причины явления ЭМИ.

5.1 Действие магнитной силы



$d\Phi$ – поток, забираемый за dt

$$d\Phi = \vec{B} d\vec{S}$$

$$d\vec{S} = -[l \vec{v}] dt$$

$$\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{B[l \vec{v}]}{dt} = -([l \vec{v}]B)$$

Доказываем, что

$$\varepsilon_i = ([l \vec{v}]B) = -\frac{d\Phi}{dt}$$

1.(В.11.93) В однородном магнитном поле с индукцией $B=0,1$ Тл движется проводник длиной $l=10$ см. Скорость движения проводника $v=15$ м/с направлена перпендикулярно к проводнику и магнитному полю. Найти индуцированную в проводнике ЭДС.

Ответ: $\mathcal{E} = -0,15$ В.

3.(В.11.95) Скорость самолета с реактивным двигателем $v=950$ км/ч. Найти ЭДС индукции $\mathcal{E}$, возникающую на концах крыльев такого самолета, если вертикальная составляющая напряженности земного магнитного поля $H_z=39,8$ А/м и размах крыльев самолета $l=12,5$ м.

Ответ: $\mathcal{E} = 165$ мВ.

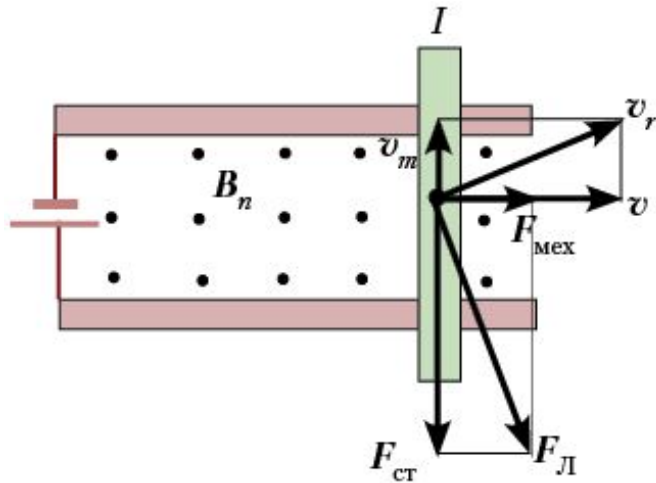
4.(Ч.25.8) В однородном магнитном поле с индукцией $B=1$ Тл находится прямой проводник длиной $l=20$ см. Концы проводника замкнуты проводом, находящимся вне поля. Сопротивление всей цепи $R = 0,1$ Ом. Найти силу F , которую нужно приложить к проводнику, чтобы перемещать его перпендикулярно линиям магнитной индукции и проводнику со скоростью $v = 2,5$ м/с.

Ответ: $F=1$ Н.

5.(Ч.25.9) Прямой проводник длиной $l=10$ см помещен в однородное магнитное поле с индукцией $B=1$ Тл. Концы проводника замкнуты гибким проводом, находящимся вне поля. Сопротивление всей цепи $R=0,4$ Ом. Какая мощность P потребуется для того, чтобы двигать проводник перпендикулярно линиям индукции и проводнику со скоростью $v=20$ м/с?

Ответ: $P=1$ мВт.

РАБОТА ПОЛНОЙ МАГНИТНОЙ СИЛЫ



Результирующая сила Лоренца перпендикулярна полной скорости электрона поэтому ее работа равна нулю. Роль сторонней будет выполнять внешняя сила, поддерживающая движение перемычки.

Заряд, протекающий в контуре при ЭМИ.

ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Пусть полный магнитный поток, сцепленный с некоторым контуром, изменяется от Ψ_1 до Ψ_2 . Найдем заряд q , который протекает при этом через каждое сечение контура.

Мгновенное значение силы тока в контуре определим по закону Ома:

$$I = \frac{\varepsilon_i}{R} = -\frac{1}{R} \frac{d\Psi}{dt}; \quad dq = Idt \Rightarrow \quad dq = -\frac{1}{R} \frac{d\Psi}{dt} dt = -\frac{d\Psi}{R}.$$

Проинтегрировав это выражение найдем, найдем заряд, обусловленный индукционным током:

$$q = \int dq = -\frac{1}{R} \int_1^2 d\Psi = -\int_1^2 \frac{d\Psi}{R} = -\frac{1}{R} (\Psi_2 - \Psi_1) = \frac{1}{R} (\Psi_1 - \Psi_2);$$

$$|q| = \frac{\Delta\Psi}{R}$$

Последнее соотношение лежит в основе разработанного А.Г. Столетовым баллистического способа измерения магнитной индукции:

$$\Psi_1 = NBS; \quad \Psi_2 = -NBS \Rightarrow \quad q = \frac{2NBS}{R} \Rightarrow$$

$$B = \frac{qR}{2NS}.$$

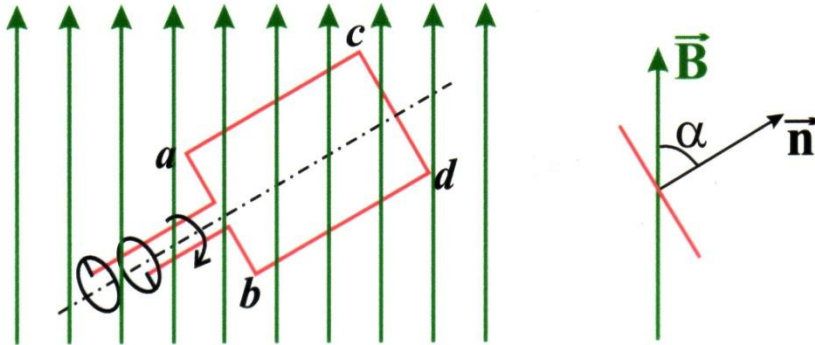
12.(Ч.25.20) Между полюсами электромагнита помещена катушка, соединенная с баллистическим гальванометром. Ось катушки параллельна линиям индукции. Катушка сопротивлением $R_1=4\ \Omega$ имеет $N=15$ витков площадью $S=2\ \text{см}^2$. Сопротивление R_2 гальванометра равно $46\ \Omega$. Когда ток в обмотке электромагнита выключили, по цепи гальванометра протекло количество электричества $q=90\ \mu\text{Кл}$. Вычислить магнитную индукцию B поля электромагнита.

Ответ: $B=1,5\ \text{Тл}$.

ИНДУКЦИОННЫЙ ГЕНЕРАТОР

Явление электромагнитной индукции

Индукционный генератор



Простейшая схема
генератора переменного тока

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

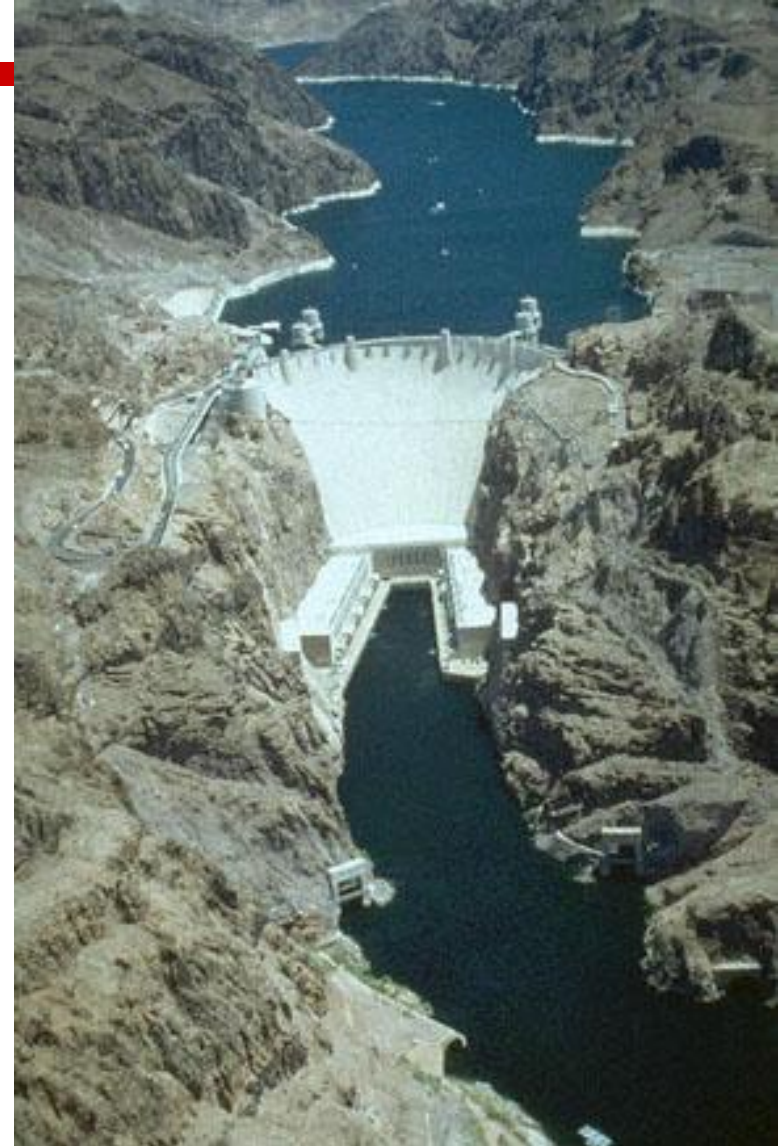
(ω - угловая скорость
вращения)

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

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

$$= BS \omega \sin \omega t = \mathcal{E}_0 \sin \omega t$$

$$I_i = \frac{\mathcal{E}_i}{R} = \frac{BS\omega}{R} = I_0 \sin \omega t$$



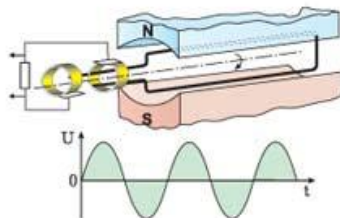
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ И ГЕНЕРАТОРЫ

10

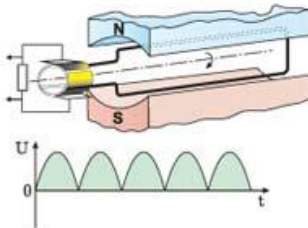
ЭЛЕКТРОСТАТИКА. ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ И ДВИГАТЕЛИ

Принцип получения переменного тока

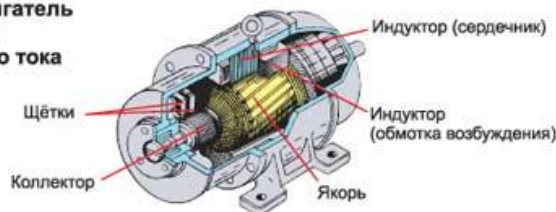


Принцип получения пульсирующего тока одного направления

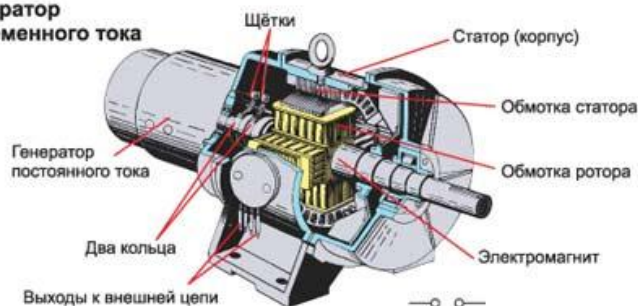


ПРИНЦИП ОБРАТИМОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Электродвигатель (генератор) постоянного тока



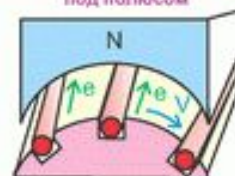
Генератор переменного тока



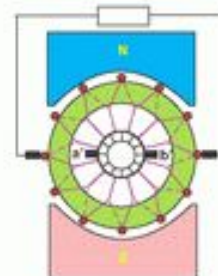
Машины постоянного тока

Электродвижущая сила якоря (ЭДС) и электромагнитный момент

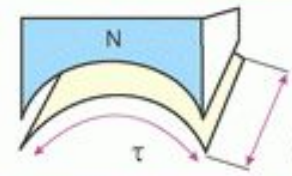
Схема движения проводника под полюсом



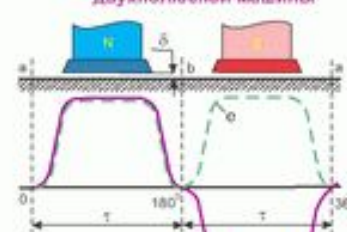
Соединение обмотки якоря с пластинами коллектора



Площадь полюсного деления



Распределение магнитной индукции в зазоре и ЭДС двухполюсной машины



ЭДС машины постоянного тока

$$E = \frac{pN}{60a} \Phi \omega = \frac{pN}{2\pi a} \Phi \omega = k \Phi \omega$$

2p - число пар полюсов;

N - число проводников обмотки якоря;

Φ - магнитный поток одного полюса, Вб;

2a - число параллельных ветвей обмотки якоря;

Электромагнитный момент машины постоянного тока

$$M_{эм} = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a = k \Phi I_a$$

ω - угловая скорость якоря, 1/с;

M_{эм} - электромагнитный момент, Нм;

E - ЭДС машины, В;

I_a - ток якоря, А;

n - частота вращения якоря, об/мин;

Южно-Уральский Государственный университет

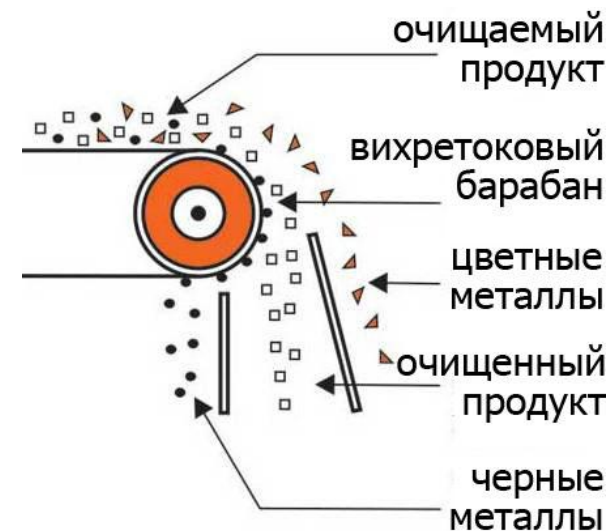
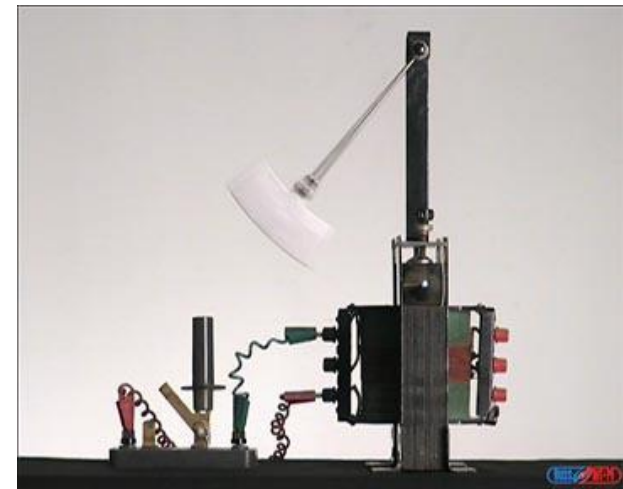
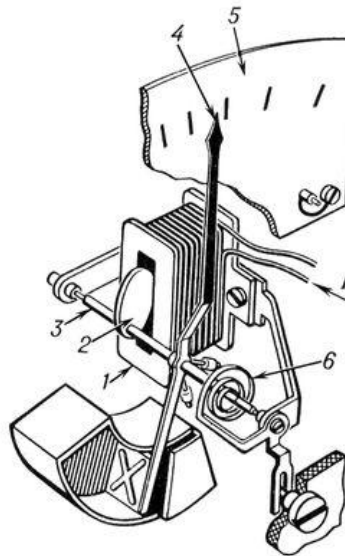
РНПО Росучприбор



454001, Челябинск, пр. Ленина, 75, ЮУрГУ, РНПО, тел. (3512) 45-55-55, http://www.rnpoross.ru

ВИХРЕВЫЕ ТОКИ ФУКО

Индукционные токи, возбуждаемые в сплошных массивных проводниках, называют токами Фуко или вихревыми токами. Электрическое сопротивление массивного проводника мало, поэтому токи Фуко могут достигать очень большой силы. В соответствии с правилом Ленца токи Фуко выбирают внутри проводника такие пути и направления, чтобы своим действием препятствовать причине их вызывающей. Поэтому движущиеся в магнитном поле хорошие проводники испытывают сильное торможение. Этим пользуются для демпфирования (успокоения) подвижных частей измерительных приборов (стрелок).



ИНДУКЦИОННАЯ ПЕЧЬ



Рис. 3. Индукционная конфорка

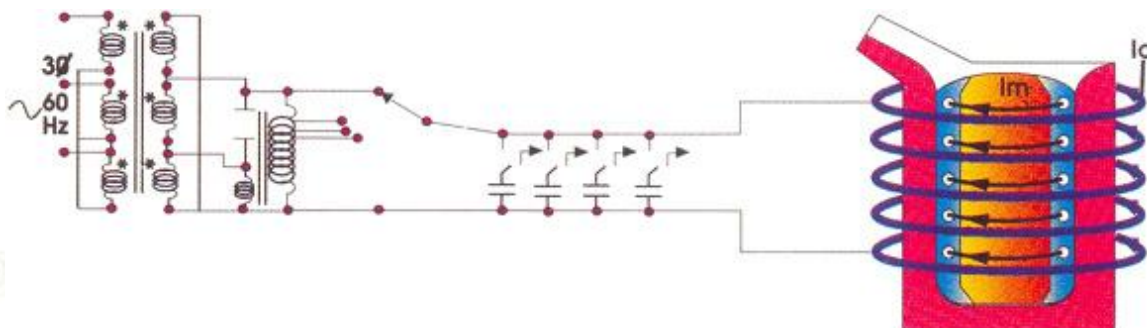
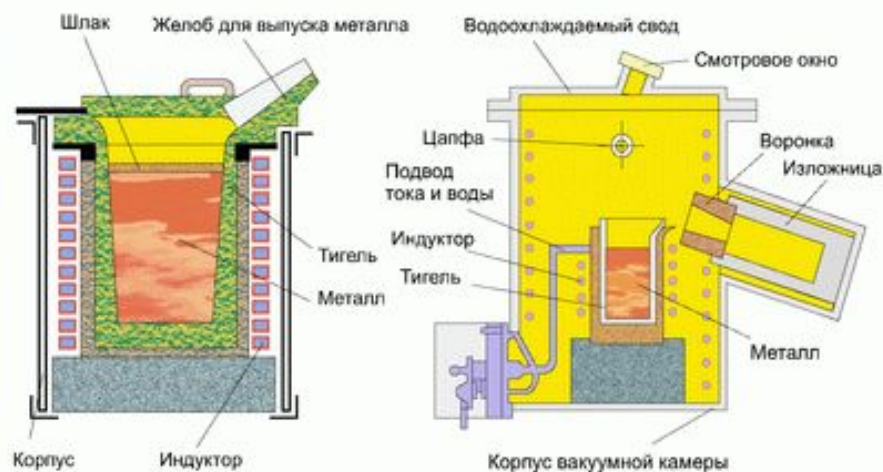


Рис.3. Принципиальная схема 3-х фазных плавильных систем промышленной частоты

Производство черных и цветных металлов Индукционная и вакуумно-индукционные печи



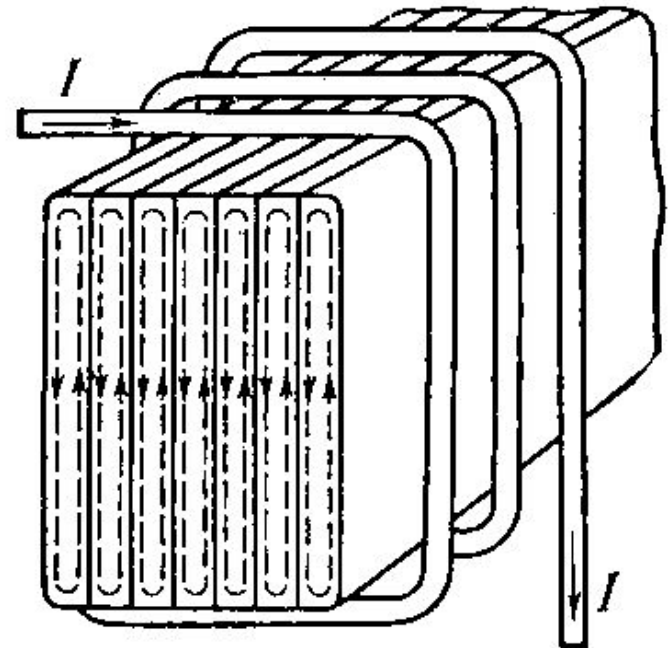
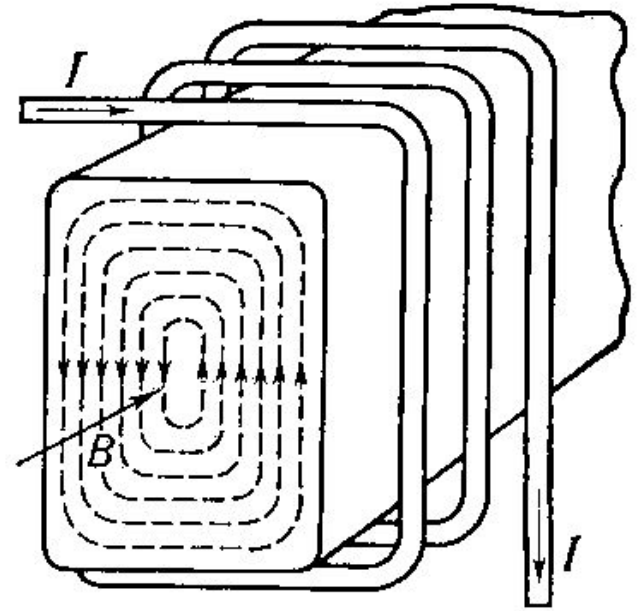
ПОДАВЛЕНИЕ ТОКОВ ФУКО

Часто токи Фуко вредны и необходимо принимать меры для борьбы с ними.

Например, для предотвращения потерь энергии на нагревание токами Фуко сердечников трансформаторов, эти сердечники набирают из тонких изолированных пластин.

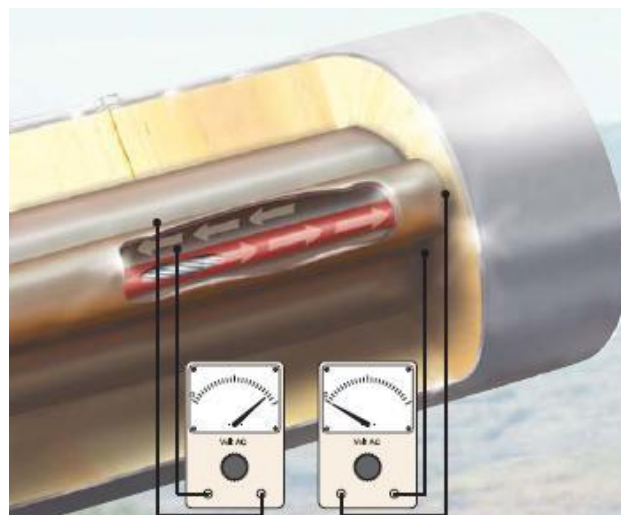
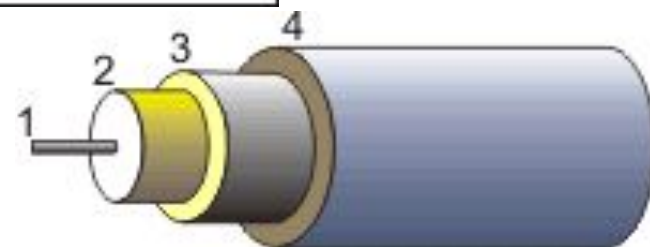
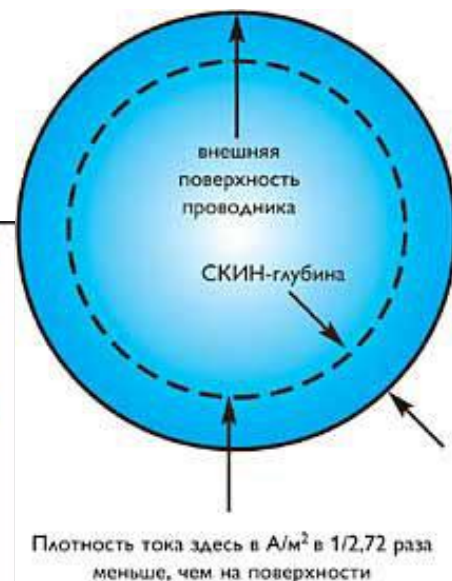
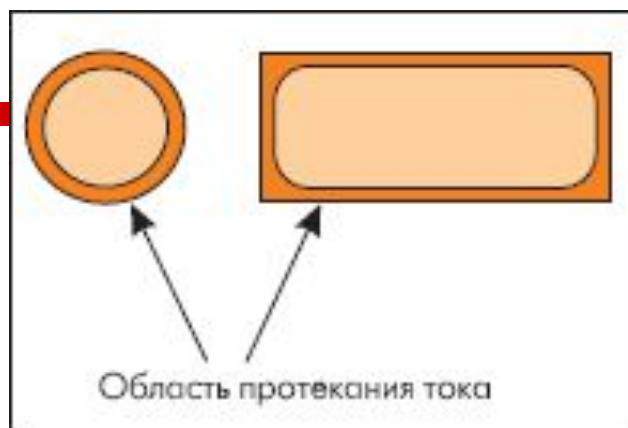
Пластины располагают так, чтобы возможные направления токов Фуко были перпендикулярны к границам пластин.

Появление ферритов (полупроводниковых магнитных материалов с большим электрическим сопротивлением) сделал возможным изготовление сплошных сердечников.

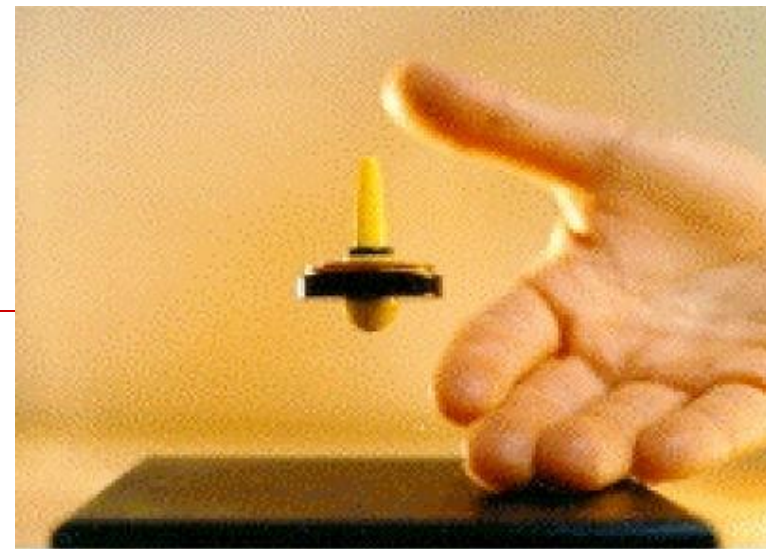
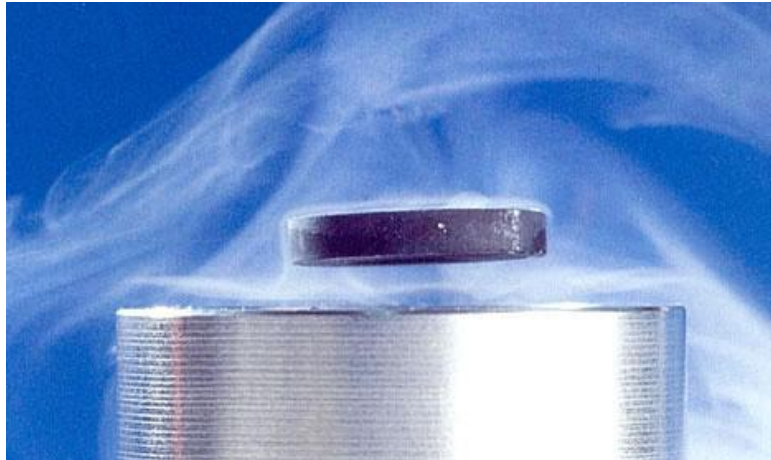


СКИН-ЭФФЕКТ

Токи Фуко, возникающие в проводах, по которым текут переменные токи, направлены так, что ослабляют ток внутри провода и усиливают вблизи поверхности. В результате быстропеременный ток оказывается распределенным по сечению провода неравномерно – он вытесняется на поверхность проводника. Это явление называют **скин-эффектом** или **поверхностным эффектом**.

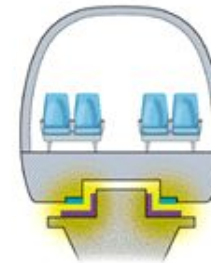


МАГНИТНОЕ ПОДВЕШИВАНИЕ



Levitation Techniques

ELECTRODYNAMIC



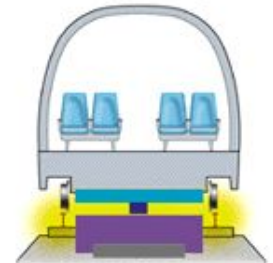
Electromagnets on the guideway levitate the car.

ELECTROMAGNETIC



Electromagnets on the cars lift the cars.

INDUCTRACK



Permanent magnets levitate over passive coils.

