

**Электромагнитна  
Индукция  
Проводник с  
Током в  
Магнитном поле**

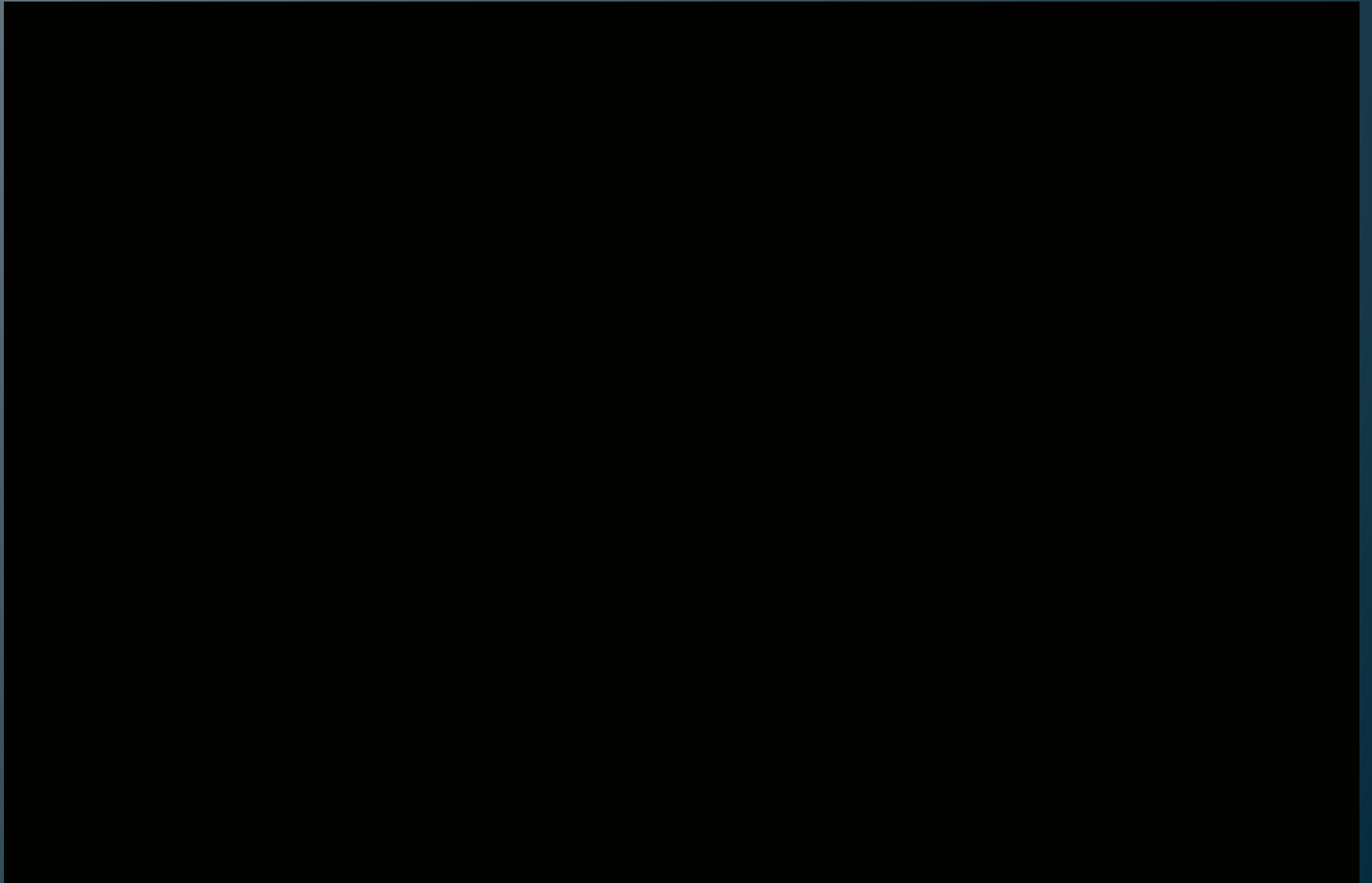
# Открытие явления электромагнитной индукции

Явление электромагнитной индукции было открыто выдающимся английским физиком **М. Фарадеем** в 1831 г.

Оно заключается в возникновении электрического тока в замкнутом проводящем контуре при изменении во времени магнитного потока, пронизывающего контур.



# Опыт Фарадея



# Явление электромагнитной индукции

Заключается в **возникновении электрического тока** в замкнутом проводящем контуре при **изменении во времени магнитного потока**, пронизывающего контур.



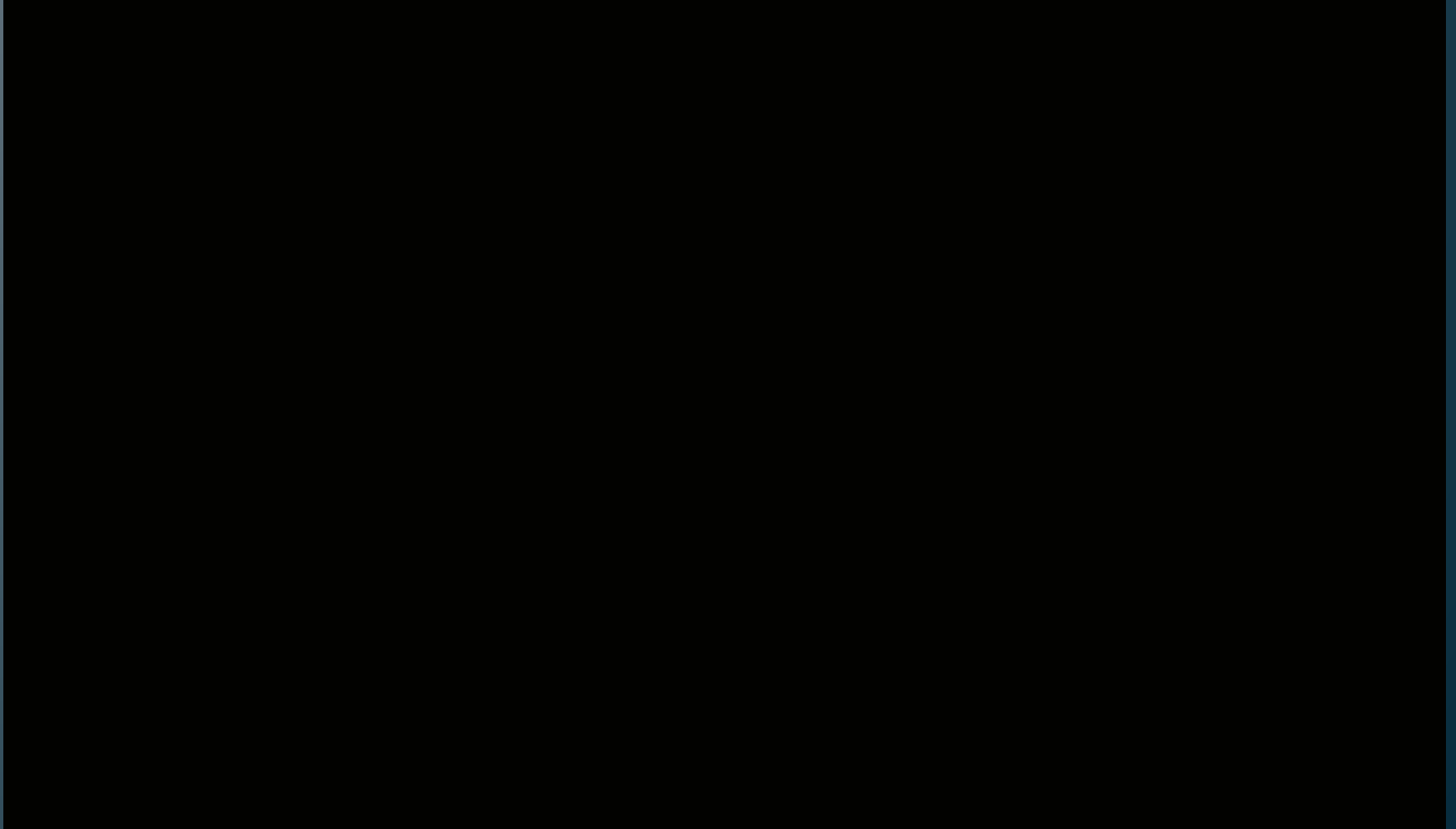
Переменное  
электрическое  
поле

Переменное  
магнитное  
поле

"Я превращал магнетизм в электричество"

Майкл Фарадей

# Явление электромагнитной индукции



# Магнитный поток

Интенсивность магнитного поля характеризуется магнитной индукцией  $B$ .  
Единица магнитной индукции — тесла (Тл).

Магнитная индукция — векторная величина. Направление этого вектора совпадает с направлением поля в данной точке.

## Магнитным потоком

$\Phi$  через площадь  $S$   
контура называют  
величину

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha$$

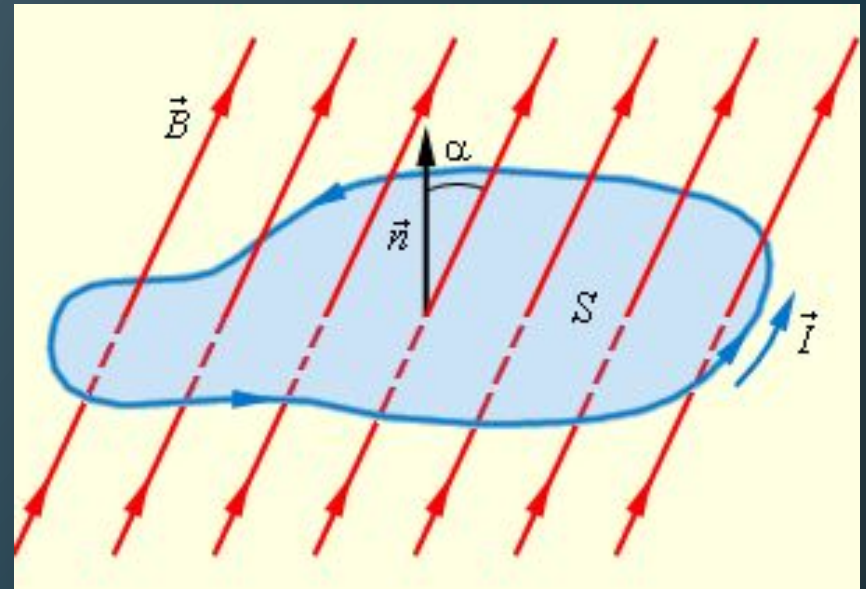
где

$B$  – модуль вектора  
магнитной индукции,

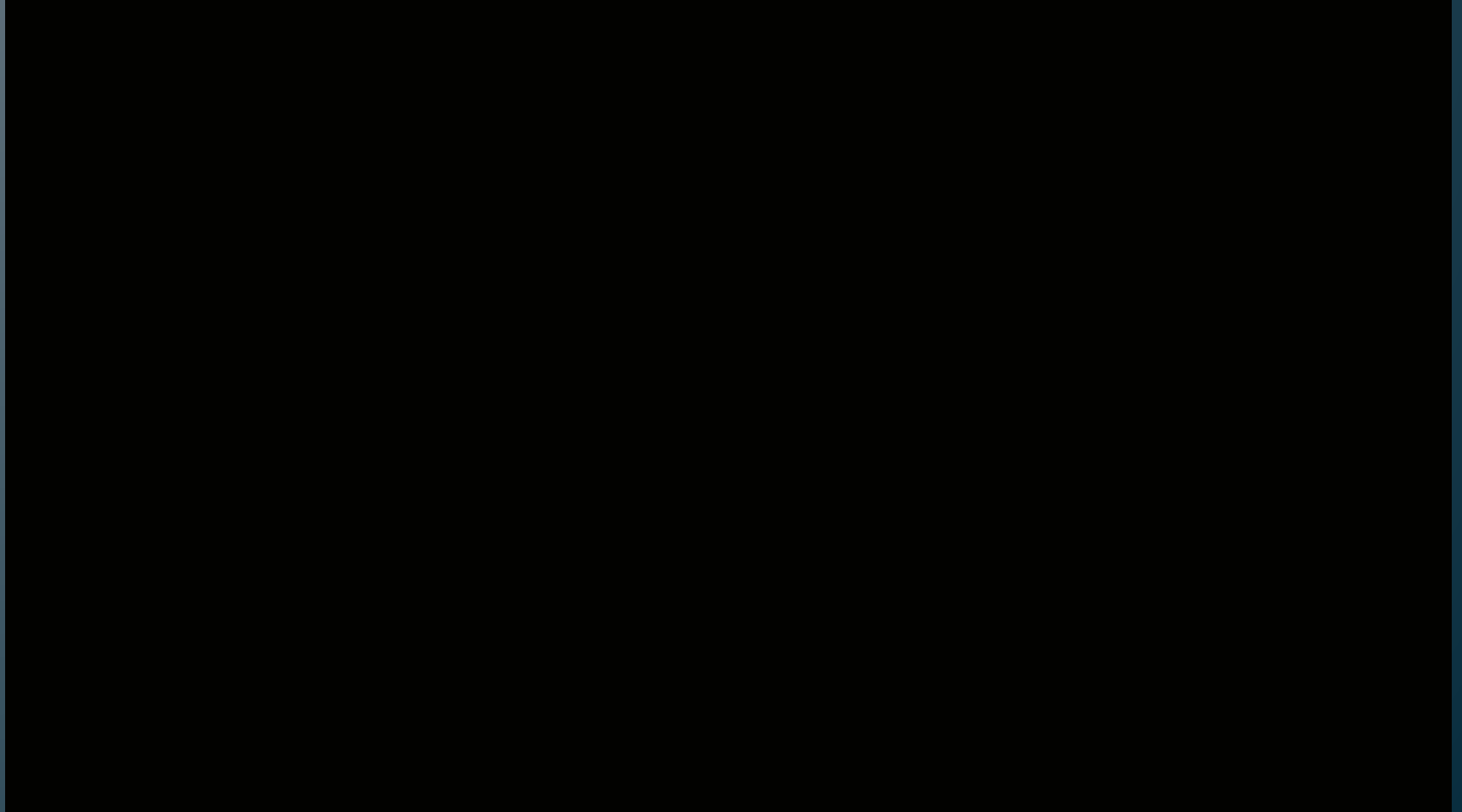
$\alpha$  – угол между вектором  
и нормалью к плоскости  
контура.

Единица магнитного  
потока в системе СИ  
называется **вебером**

(Вб)



# Явление электромагнитной индукции





# Электромагнитная сила (сила Ампера)

- Это сила  $F$ , с которой внешнее магнитное поле действует на помещенный в это поле проводник с током длиной  $L$ .

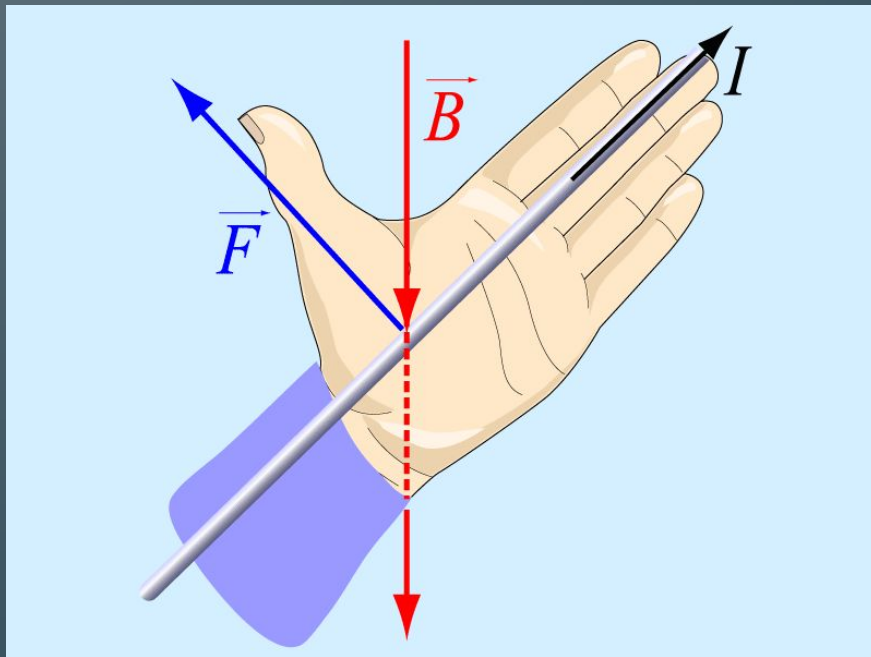
$$F = IBL.$$

Если проводник с током расположен под углом  $\alpha$  к вектору магнитной индукции  $B$ , то

$$F = IBL \sin \alpha.$$

Направление электромагнитной силы определяют по правилу левой руки.

# Правило левой руки (направление силы Ампера)



Если ладонь левой руки расположить так, чтобы в нее входили линии магнитной индукции, а четыре вытянутых пальца расположить по направлению тока в проводнике, то отогнутый большой палец покажет направление силы Ампера, действующей со стороны магнитного поля на проводник с током.

- Механическую работу по перемещению проводника с током в магнитном поле на расстояние  $a$  вычисляют по формуле

$$A = Fa = IBLa = I\Phi.$$

где  $S$  — площадь, описанная проводником при его перемещении,  $\text{м}^2$ .

Работу выражают в джоулях (Дж).

# Взаимодействие проводников с током

- Сила взаимодействия проводников, по которым проходят токи  $I_1$  и  $I_2$ ,

$$F = \mu_a \frac{I_1 I_2}{2\pi a} L$$

где  $\mu_a$  — абсолютная магнитная проницаемость, Гн/м;  $L$  — длина проводников, м;  $a$  — расстояние между ними, м;  $F$  — сила взаимодействия, Н.

• Абсолютная магнитная проницаемость воздуха и всех веществ, за исключением ферромагнитных материалов, близка к абсолютной магнитной проницаемости вакуума, называемой магнитной постоянной:

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ Гн/м} = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м.}$$

Абсолютная магнитная проницаемость вещества

$$\mu_a = \mu_0 \mu,$$

где  $\mu$  — магнитная проницаемость, показывающая, во сколько раз абсолютная магнитная проницаемость данного материала больше

# Напряженность магнитного поля. Магнитное напряжение

- Напряженность магнитного поля (А/м)

$$H = \frac{B}{\mu_a} = \frac{B}{\mu\mu_0}$$

Напряженность магнитного поля — вектор, направление которого совпадает с направлением поля в данной точке.



- Произведение напряженности магнитного поля  $H$  на длину участка магнитной линии  $\Delta L$  называют магнитным напряжением и выражают в амперах (А).

Магнитное напряжение, взятое по всей длине линии магнитной индукции, называют магнитодвижущей силой (МДС) или намагничивающей силой (НС)  $F_m$ .

# Закон полного тока

- Полный ток—это алгебраическая сумма токов, пронизывающих поверхность, ограниченную замкнутым контуром.

*По закону полного тока намагничивающая сила (НС)  $F_m$  вдоль замкнутого контура равна полному току:*

$$F_m = NI.$$



# Прямолинейный проводник

- Напряженность (А/м) магнитного поля в точке, удаленной на расстояние  $R$  от прямолинейного проводника,

$$H = \frac{I}{2\pi R}.$$

Магнитная индукция

$$B = \mu\mu_0 \frac{I}{2\pi R}.$$

- Напряженность магнитного поля внутри проводника в точке, удаленной от ее оси на расстояние  $a$ ,

$$H = \frac{I}{2\pi R^2} a$$

Если  $a=R$ , то напряженность на поверхности такого проводника

$$H = \frac{I}{2\pi R}$$

где  $R$  - радиус цилиндрического проводника, м.

# Кольцевой проводник

- Напряженность магнитного поля в центре кольцевого проводника

$$H = \frac{I}{2R} = \frac{I}{d}$$

где  $R$  — радиус кольца, м.

Напряженность магнитного поля внутри кольцевой катушки

$$H = \frac{Iw}{2\pi R_x}$$

где  $R_x$  — радиус от центра кольцевой катушки до искомой точки, м.

Магнитная индукция

$$B = \mu\mu_0 H = \mu\mu_0 \frac{Iw}{2\pi R_x}.$$

# Кольцевая (тороидальная) катушка

- Напряженность магнитного поля на средней магнитной линии кольцевой (тороидальной) катушки

$$H = \frac{Iw}{l}$$

где  $I$  — ток в обмотке катушки, А;  $w$  — число витков катушки;  $l$  — длина средней магнитной линии катушки, м.

Магнитная индукция

$$B = \mu_a H = \mu_a \frac{Iw}{l}.$$

Магнитный поток

$$\Phi = BS = \mu_a \frac{IwS}{l}.$$

где  $S$  — площадь поперечного сечения катушки, м<sup>2</sup>.

# Цилиндрическая катушка

- Напряженность магнитного поля на оси цилиндрической катушки в любой ее точке

$$H = \frac{Iw}{2l} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)$$

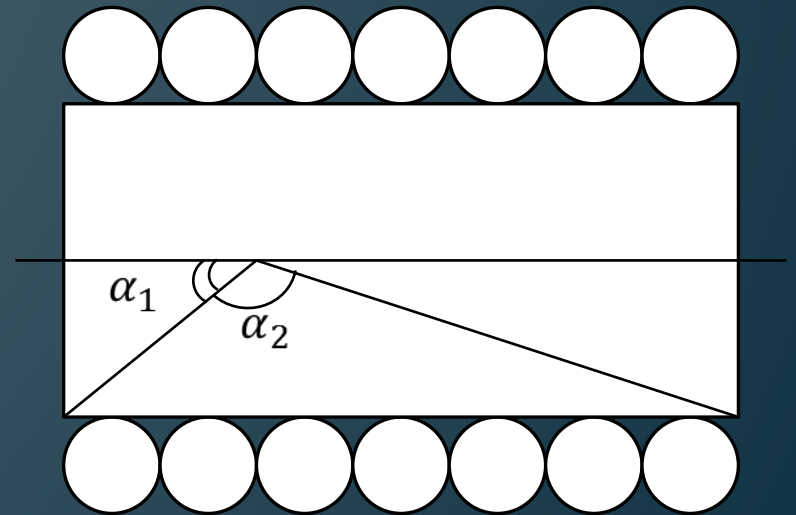
Если  $d \ll l$ , то  $H = \frac{Iw}{l}$ .

Магнитная индукция

$$B = \mu\mu_0 H = \mu\mu_0 \frac{Iw}{2l} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2),$$

или, по приближенной формуле, при условии  $d \ll l$

$$B = \mu\mu_0 \frac{Iw}{l}.$$



## ИНДУКЦИИ

- **Правило Ленца:**

При изменении магнитного потока в проводящем контуре **возникает ЭДС индукции**  $E_{\text{инд}}$ , равная скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, взятой со знаком минус:

$$e = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

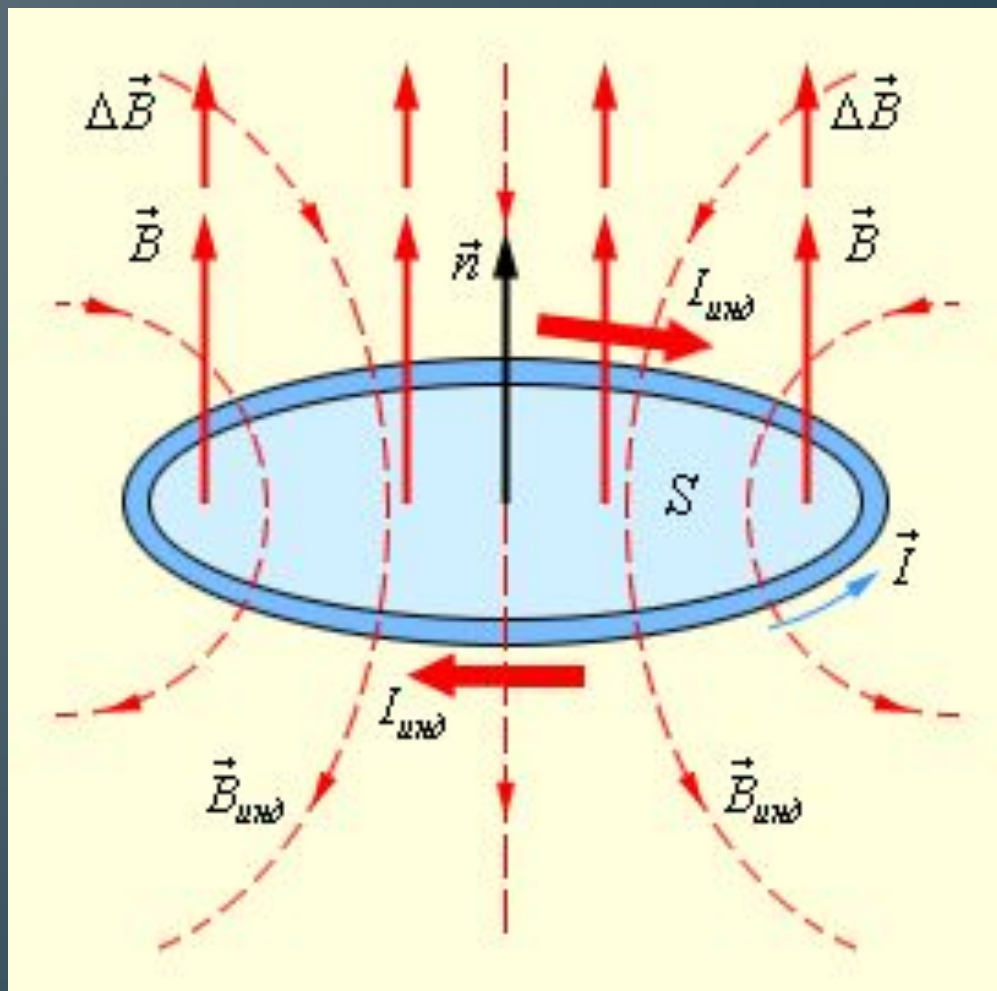
$e$  – мгновенное значение электродвижущей силы, наведенной в контуре.

ЭДС, наведенная в катушке с числом витков  $w$ ,

$$e = -w \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \text{ или } e = - \frac{\Delta \Psi}{\Delta t},$$

где  $\Psi$  – потокосцепление, Вб;  $\Psi = \Phi w$ .





В этом примере  $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} > 0$ , а  $E_{\text{инд}} < 0$ . Индукционный ток  $I_{\text{инд}}$  течет навстречу выбранному положительному направлению обхода контура.

# Зависимость индукционного тока от скорости изменения магнитного потока





# ЭДС электромагнитной индукции

$$E = Blv$$

$B$  — магнитная индукция, Тл;

$l$  — активная длина проводника, м;

$v$  — скорость перемещения проводника, м/с.

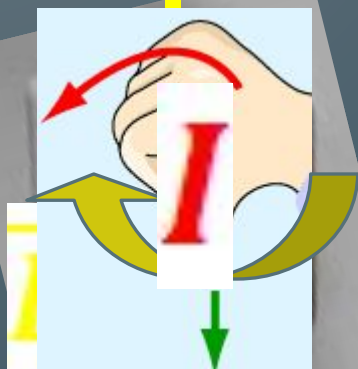
При движении проводника в плоскости, расположенной под углом  $\alpha$  к вектору магнитной индукции,

$$E = Blv \sin \alpha$$

Направление наведенной ЭДС определяется правилом правой руки.

# Правило Ленца

I случай



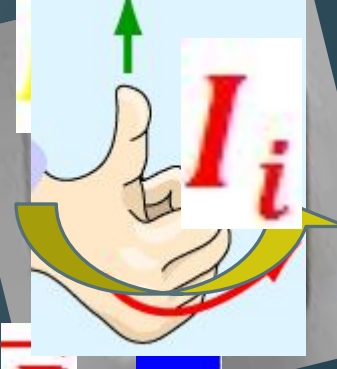
$$\Delta\Phi > 0$$

II случай



$$\Delta\Phi > 0$$

III случай

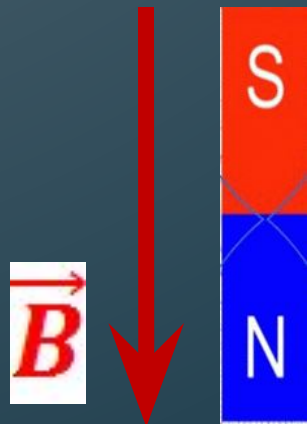
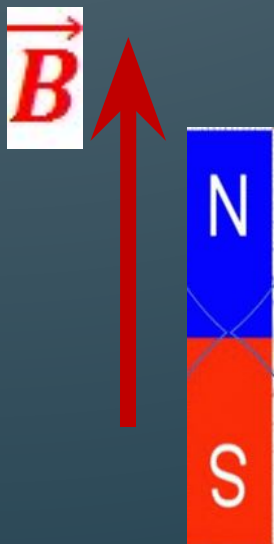


$$\Delta\Phi < 0$$

IV случай



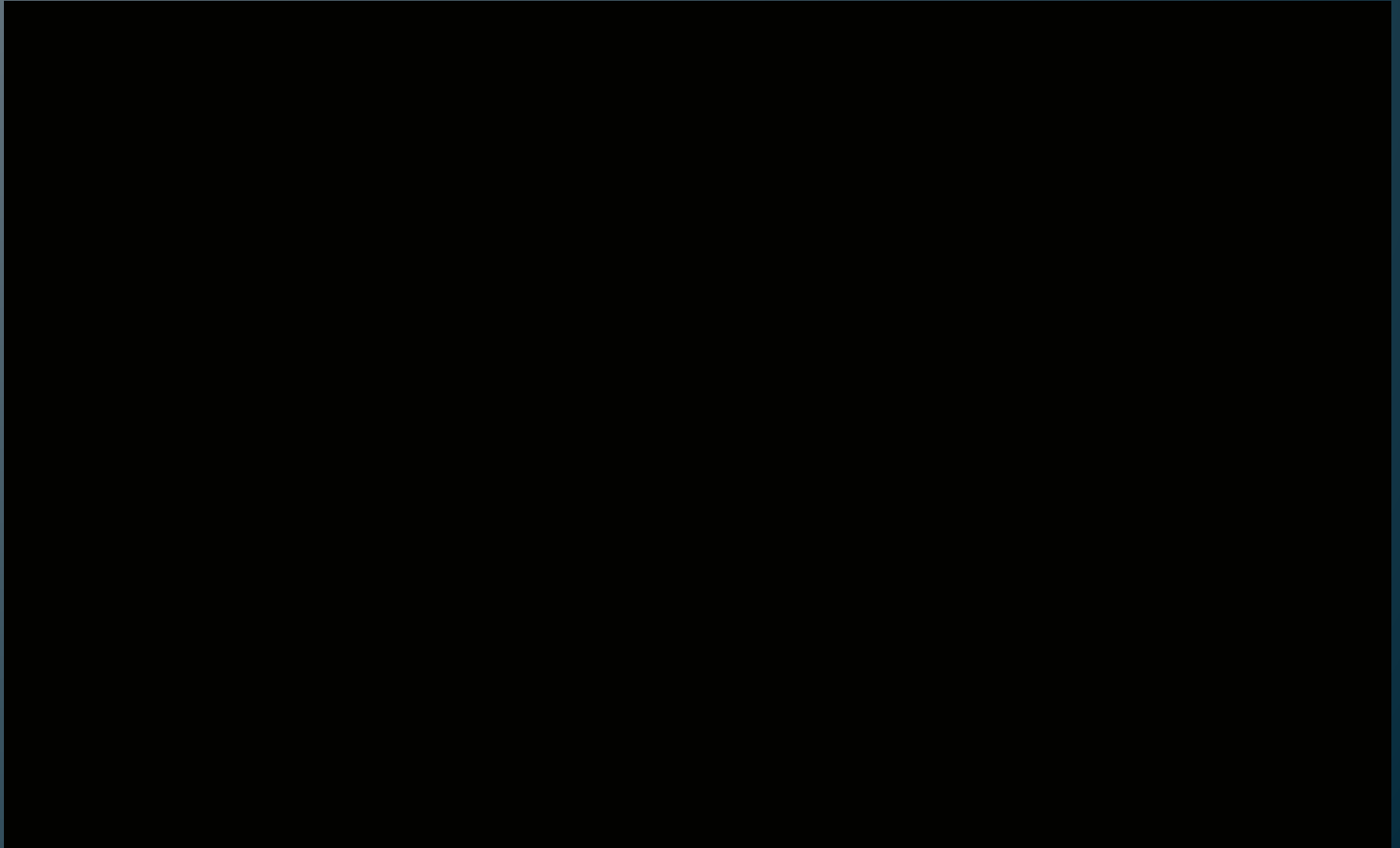
$$\Delta\Phi < 0$$



# Получение индукционного тока



# Генератор переменного тока



# ИНДУКТИВНОСТЬ

- Коэффициент пропорциональности между потокосцеплением самоиндукции  $\Psi_L$  и током  $I$  катушки или контура при неизменной магнитной проницаемости среды, измеряется в Гн.

$$L = \frac{\Psi_L}{I}$$

Явление возникновения ЭДС в контуре, вызванное изменением тока  $i$  в этом же контуре, называют самоиндукцией, а наведенная при этом ЭДС — ЭДС самоиндукции

$$e_L = -\frac{\Delta\Psi_L}{\Delta t} \quad \text{или} \quad e_L = -L \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

# Энергия магнитного поля

- Для кольцевой катушки энергия магнитного поля, выражаемая в джоулях (Дж),

$$W = \frac{\Psi I}{2} = \frac{LI^2}{2}$$