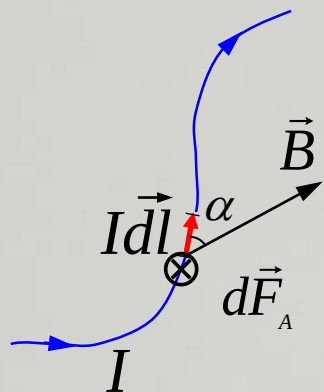


Лекция 12.
Теорема о циркуляции.
Электромагнитная индукция



14.6. Сила Ампера

– сила, действующая на элемент проводника с током в магнитном поле:



$$d\vec{F}_A = I \cdot [d\vec{l} \cdot \vec{B}]$$

$$dF_A = Idl \cdot B \cdot \sin \alpha$$

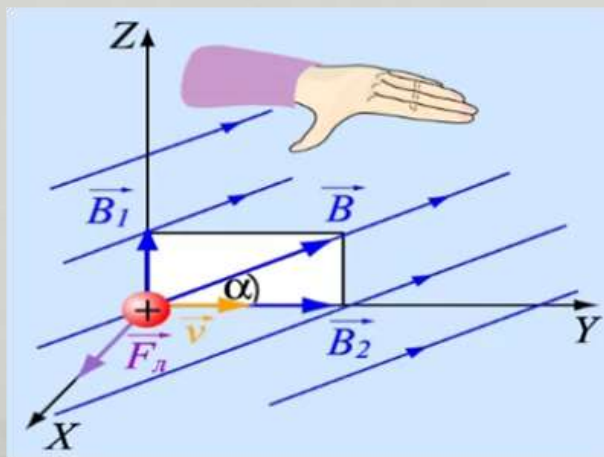
Пример. Два параллельных проводника с током:

Д.3.

$$F_A = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi r}$$

14.7. Сила Лоренца (1895 г.)

Сила, действующая на заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле

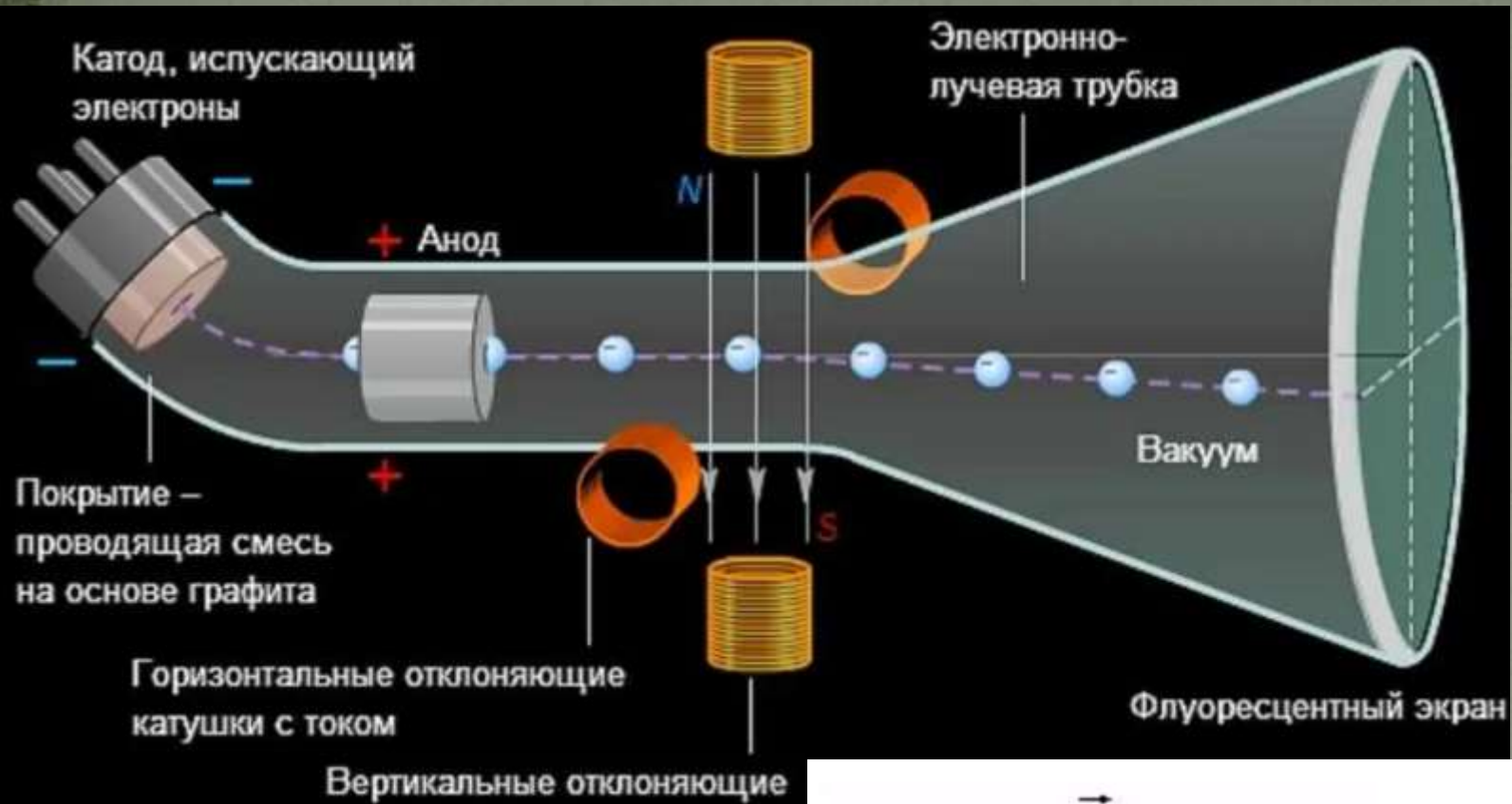


$$\vec{F}_L = q \cdot [\vec{v}, \vec{B}]$$

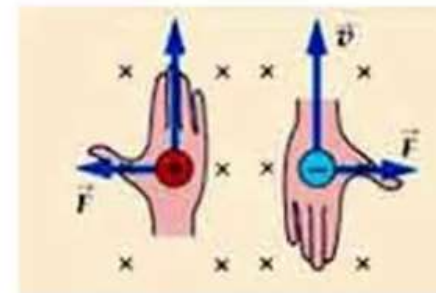
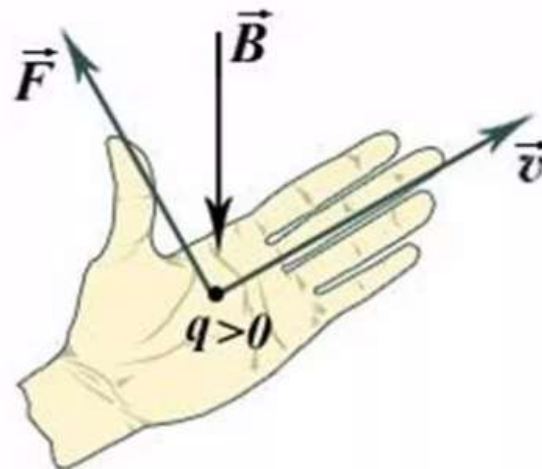
$$F_L = |q| \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$$

Эксперимент !!

Электронно-лучевая трубка



Сила Лоренца



Электронно-лучевая трубка

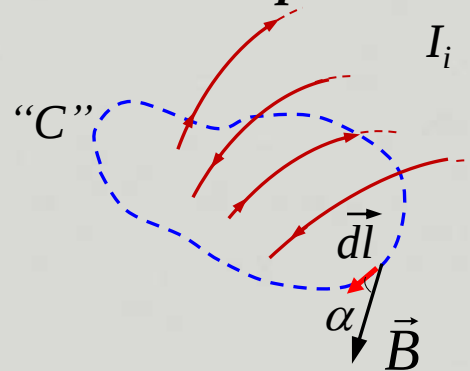
Сила Лорентца



§ 15. Теорема о циркуляции вектора магнитной индукции

15.1. Формулировка теоремы

➡ (Опр.) Циркуляцией вектора (например, $\vec{B}$) по замкнутому контуру “С” называется криволинейный интеграл вида: $\oint_C (\vec{B}, d\vec{l})$



♣ Циркуляция вектора индукции магнитостатического поля по любому замкнутому контуру “С” в вакууме пропорциональна алгебраической сумме сил токов, пронизывающих поверхность, ограниченную этим контуром:

$$\oint_C (\vec{B}, d\vec{l}) = \mu_0 \sum_i I_i$$

или

$$\mu_0 \int_{\Sigma} (\vec{j}, d\vec{S})$$

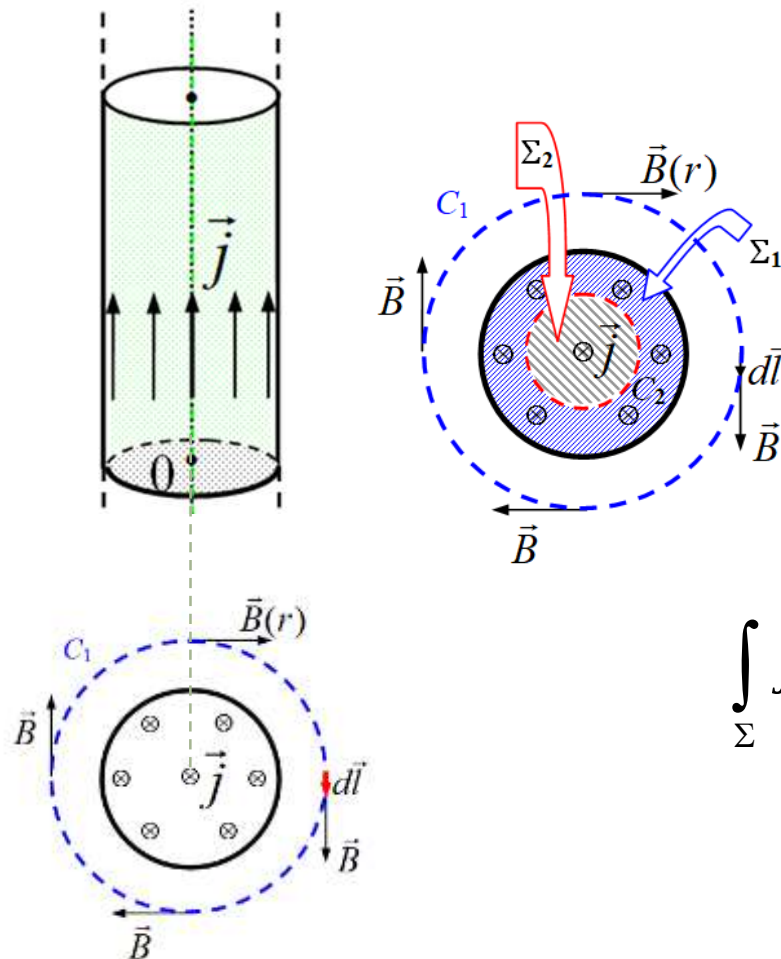
15.2. Применение теоремы о циркуляции вектора магнитной индукции

Пример. (Задача 10.4) По длинному прямолинейному проводнику радиуса R течёт ток. Плотность тока распределена равномерно по сечению проводника и равна j . Найти зависимость индукции магнитного поля тока как **внутри**, так и **вне** этого проводника.

1. Рисунок !

2. “Структура поля”

3. Выбор контура



4. “Вычислим” циркуляцию:

$$\oint_{C} (\vec{B}, d\vec{l}) = \oint_{C} B(r) dl = B(r) \oint_{C} dl = B(r) \cdot 2\pi r$$

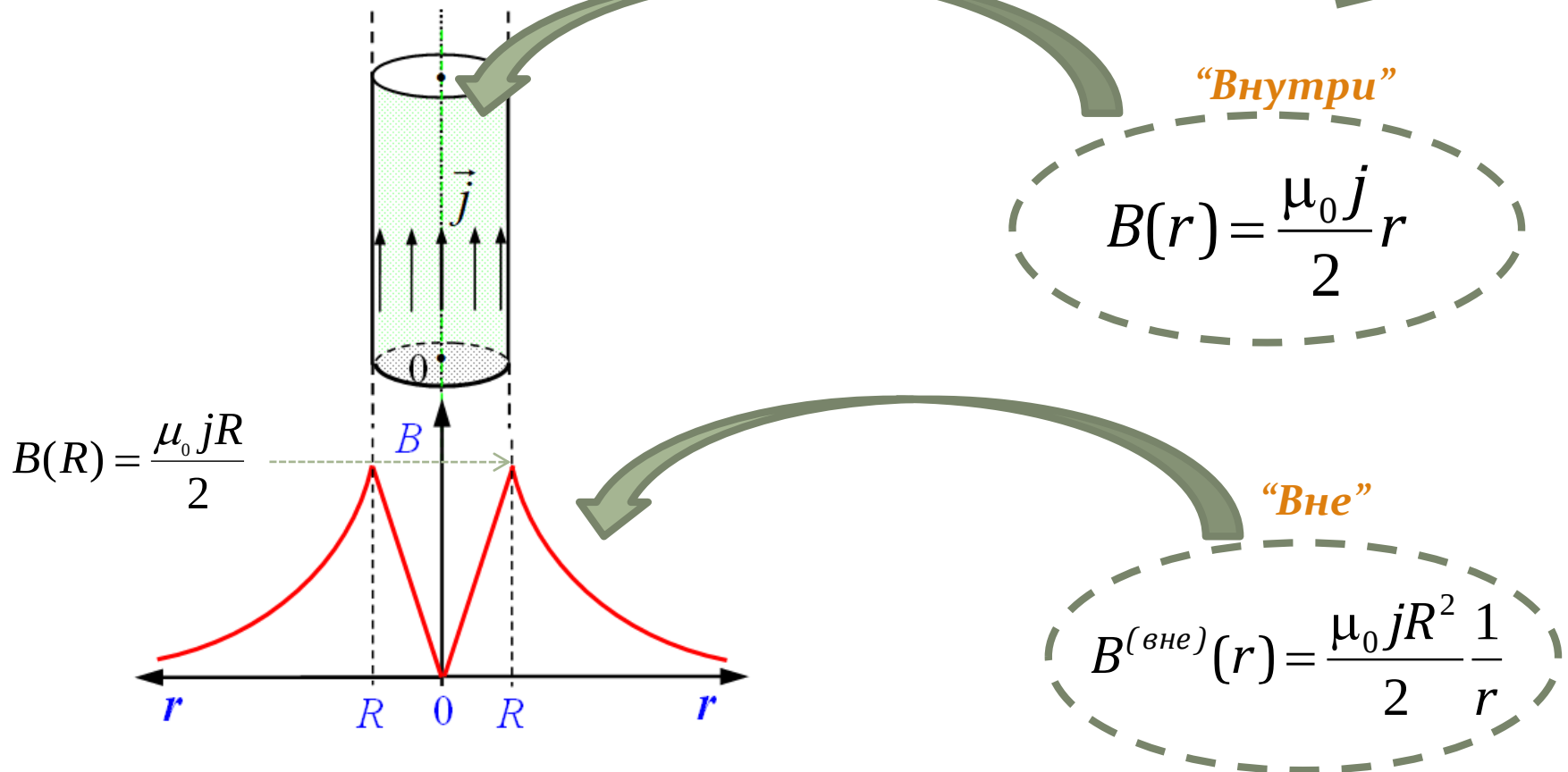
5. “Вычислим” силу тока:

$$\int_{\Sigma} j_n dS = \begin{cases} j \cdot \pi R^2 - \text{для поля вне проводника, } C_1 \\ j \cdot \pi r^2 - \text{для поля внутри проводника, } C_2 \end{cases}$$

6. Применим теорему:

$$B(r) \cdot 2\pi r = \mu_0 \cdot \begin{cases} j \cdot \pi R^2, & r > R \\ j \cdot \pi r^2, & r \leq R \end{cases}$$

Результаты :



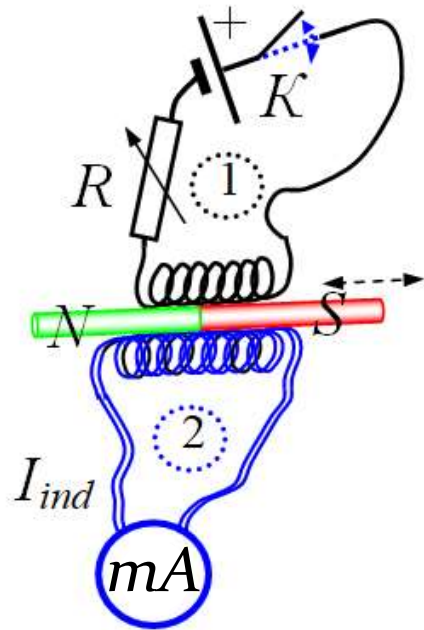
§ 16. Электромагнитная индукция

16.1. Открытие Фарадеем явления электромагнитной индукции («опыты Фарадея»)

“Экономический эффект от открытия Майкла Фарадея превышает таковой от Лондонской товарной биржи за все годы её существования!”

- М. Тэтчер

Опыты Фарадея (1831):



1) ...

2) ...

3) ...

4) ...

5) ...

6) ...

...
⇒

$$\Delta\Phi_B \Rightarrow I_{ind}$$

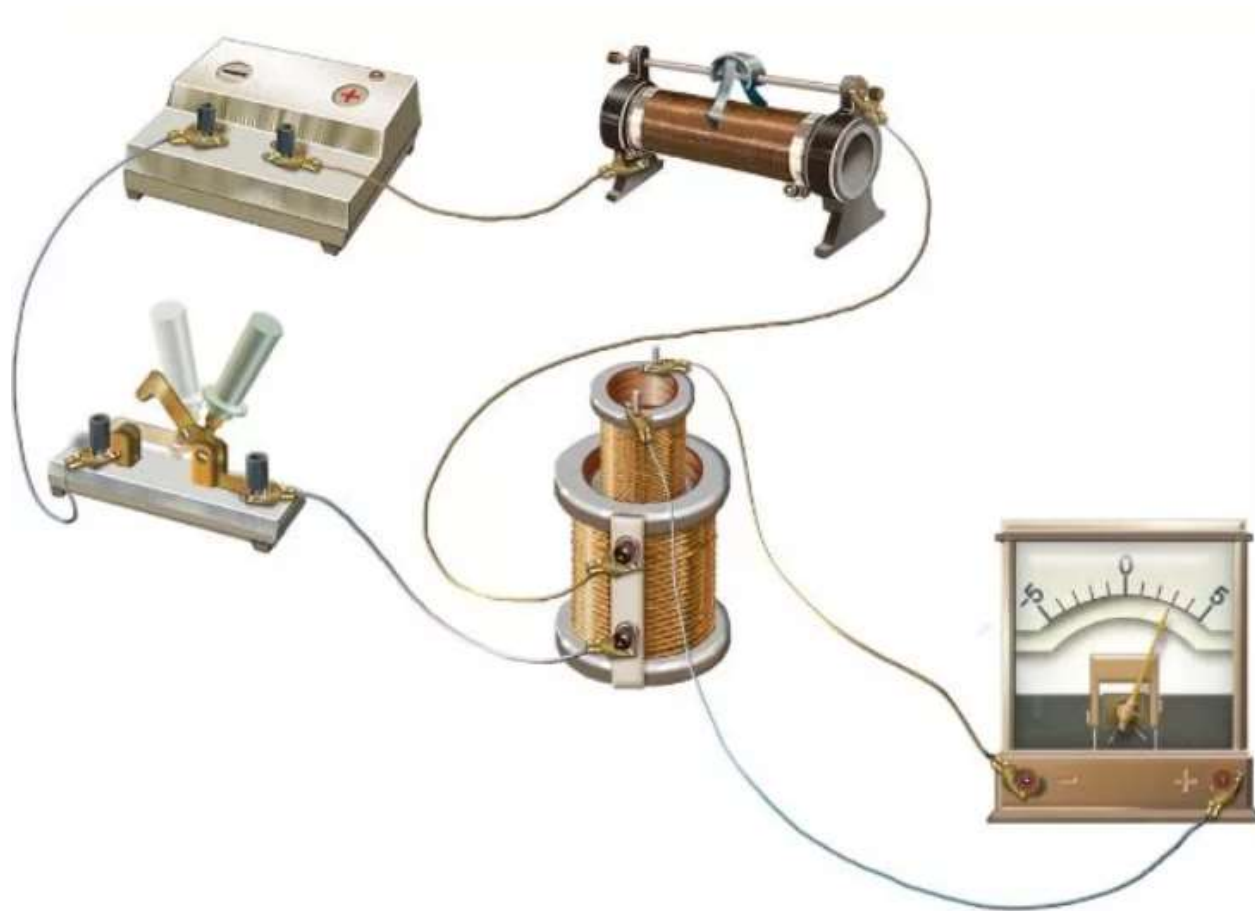
Электрический ток индуцируется («наводится») **при любом изменении магнитного потока** !!

Фарадей:

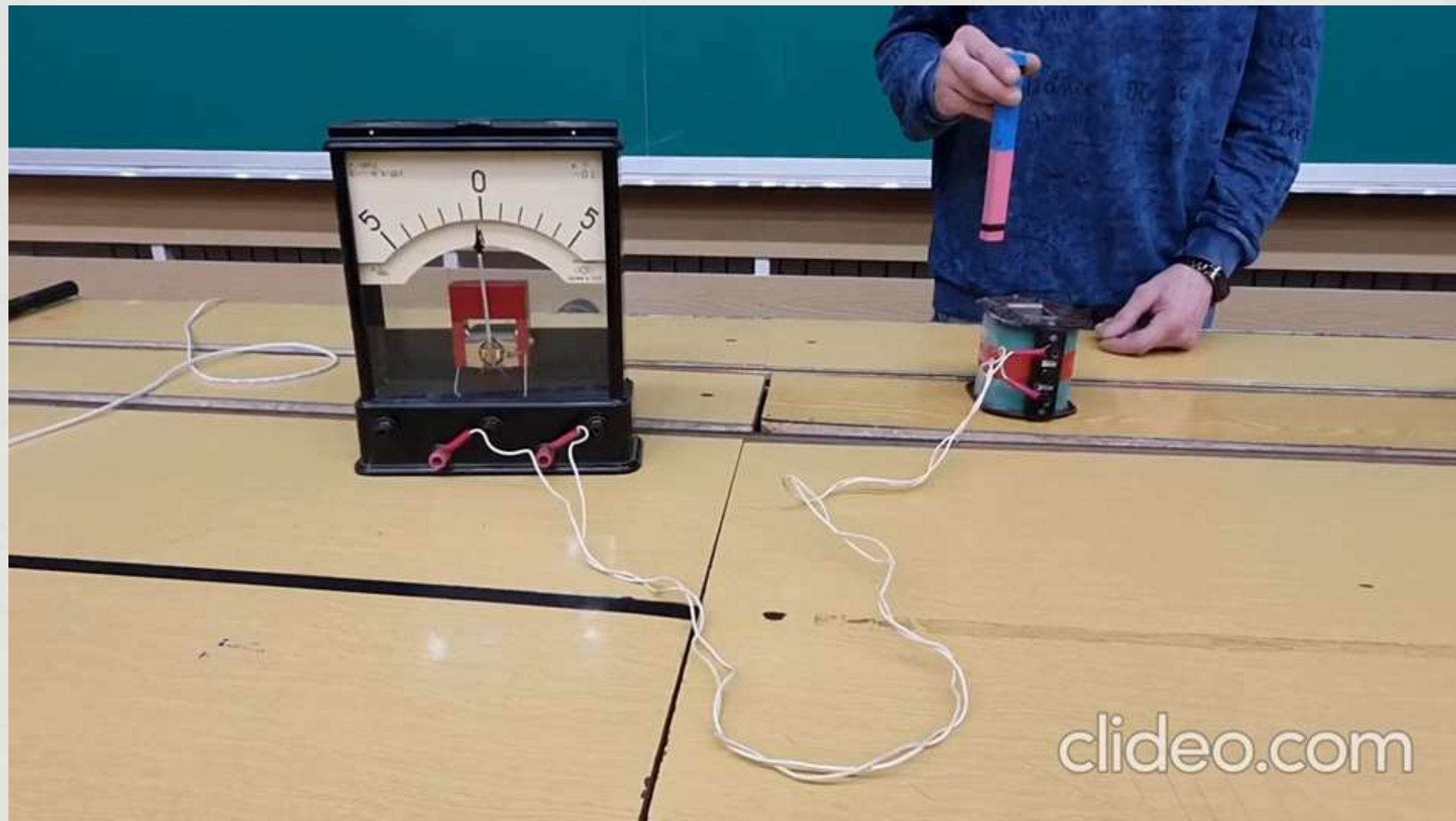
$$I_{ind} \sim \left| \frac{d\Phi_B}{dt} \right|$$

♣ Явление электромагнитной индукции состоит в возникновении электрического тока в проводящем контуре **при изменении магнитного потока** через поверхность, ограниченную этим контуром

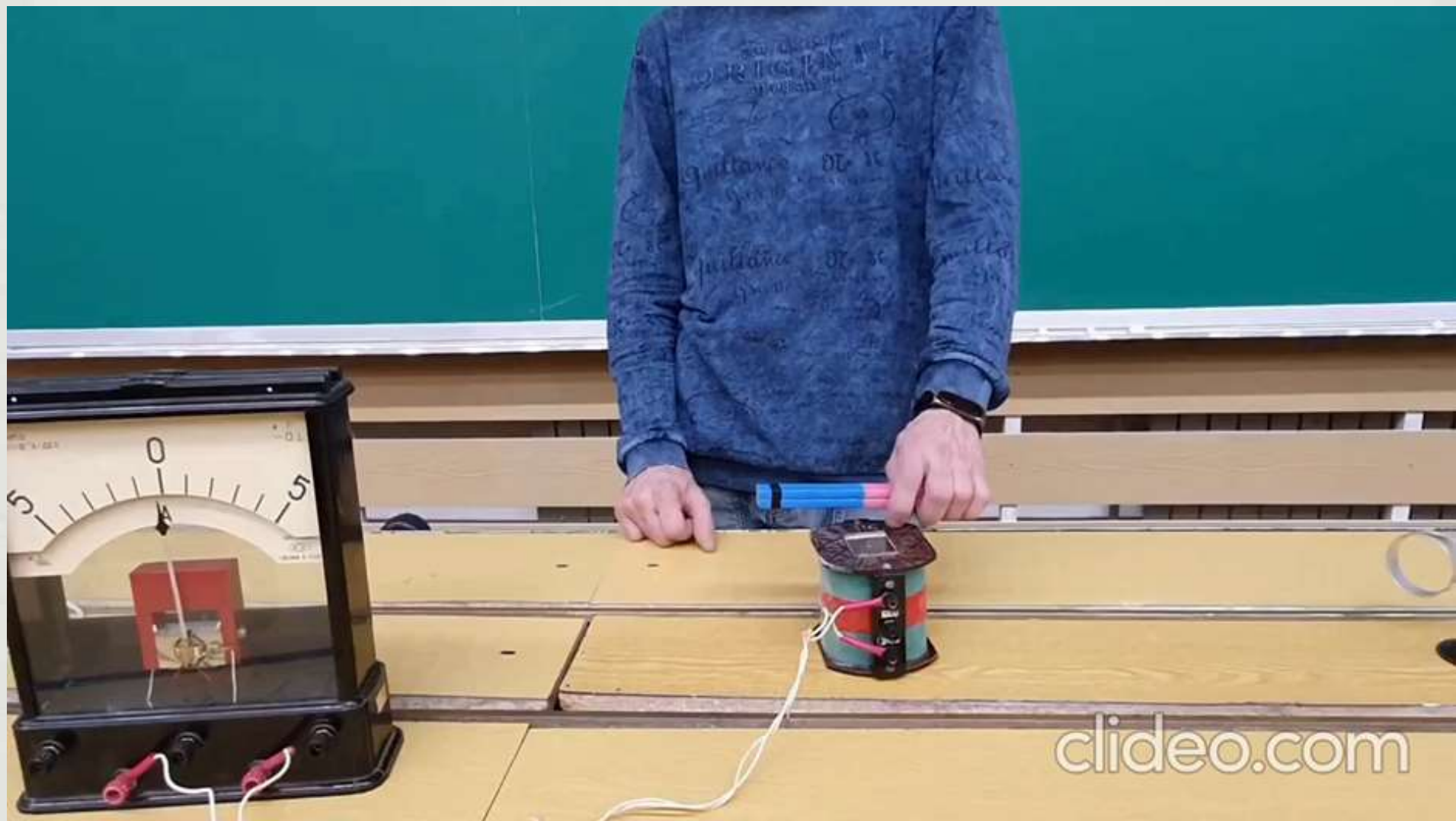
Опыты Фарадея



Опыты Фарадея



Опыты Фарадея



Опыты Фарадея

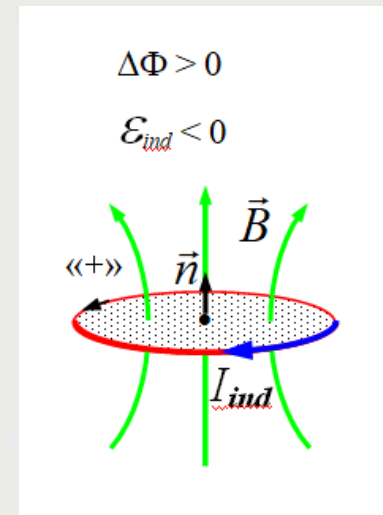
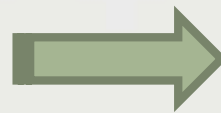


16.2. Правило Ленца

- Индукционный ток направлен так, чтобы препятствовать причине, его вызывающей

1) выбор $\vec{n}^{(+)}$ $\Rightarrow$

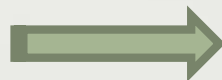
2) (+) направление обхода



16.3. Закон электромагнитной индукции (Фарадея – Максвелла)

- ♣ ЭДС электромагнитной индукции пропорциональна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром:

$$\mathcal{E}_i \sim \left| \frac{d\Phi}{dt} \right|$$



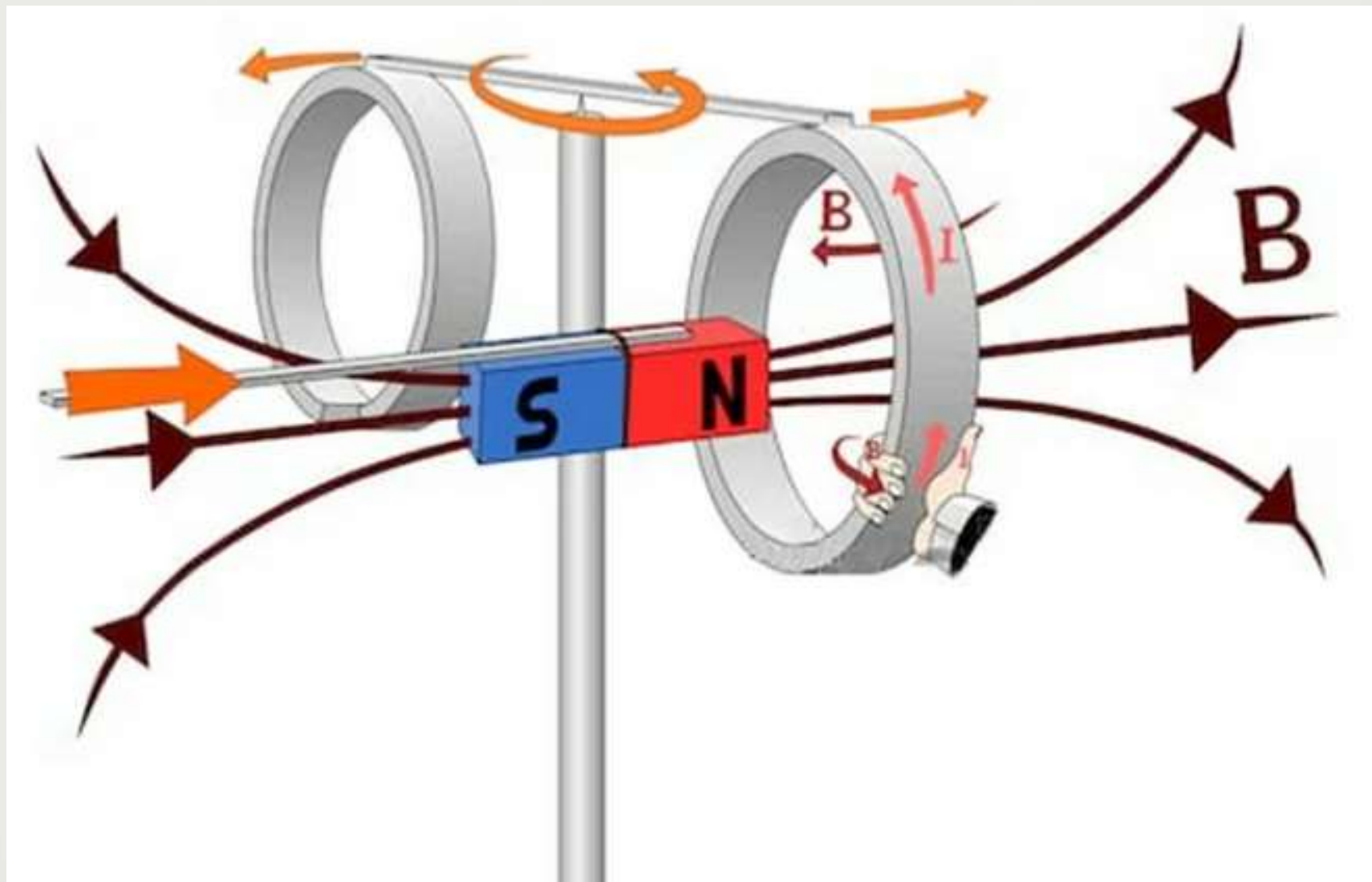
правило Ленца

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

Правило Ленца



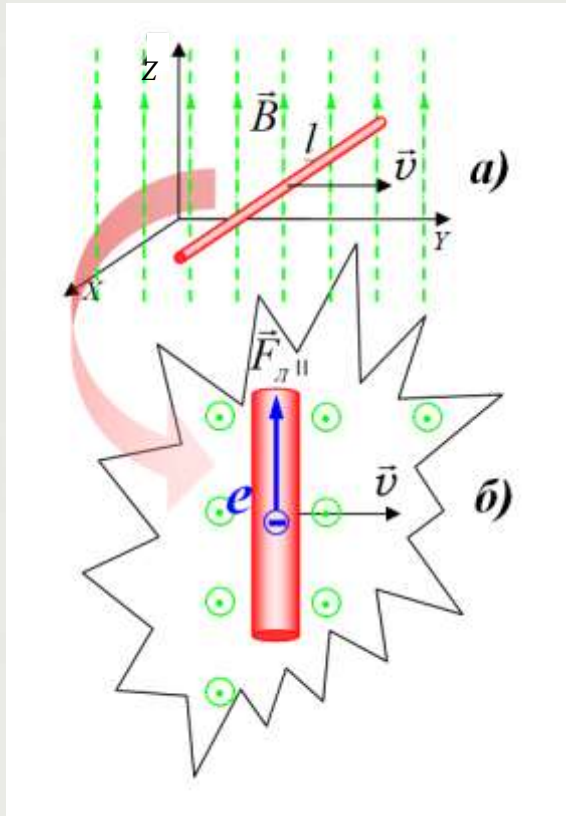
Правило Ленца



Правило Ленца



16.4. ЭДС индукции в движущихся проводниках



$$\mathcal{E}_i = \frac{A^{cm}}{q} = \frac{qvBl}{q}$$

$$\mathcal{E}_i = vBl$$

Пример. Автомобиль едет с востока на запад.
 $v = 72 \text{ км/час}$, $l = 1 \text{ м}$, $B_x = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$.

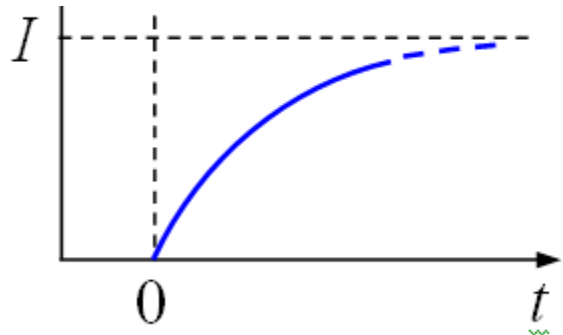
«Антенна автомобиля»: $\mathcal{E}_{ind} = (20 \text{ м/с}) \cdot (2 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}) \cdot (1 \text{ м}) =$
 $= 4 \cdot 10^{-4} \text{ В} = 0,4 \text{ мВ}$.

А крылья самолёта ?

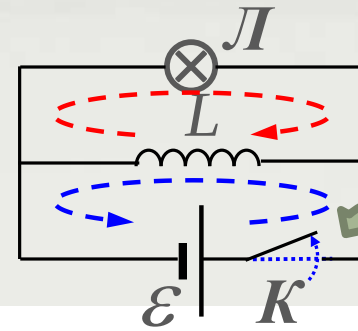
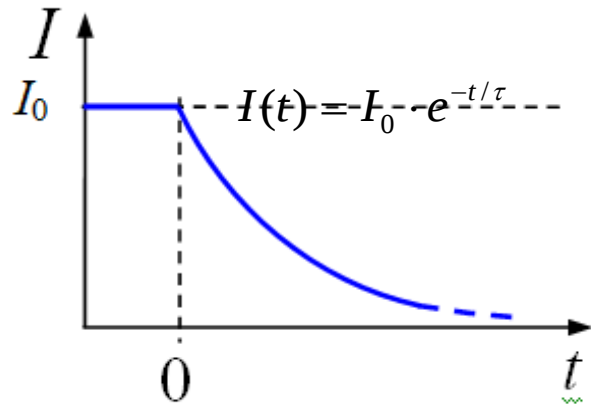
16.5. Самоиндукция. Индуктивность

$$\mathcal{E}_{si} = - \frac{d\Phi_s}{dt}$$

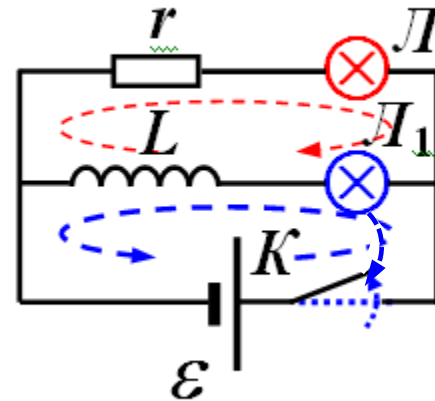
Φ_s — “собственный” магнитный поток



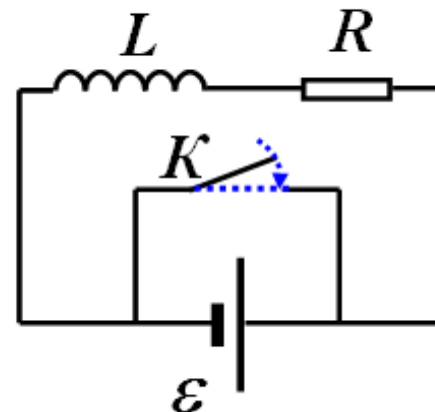
Ещё примеры проявления самоиндукции:



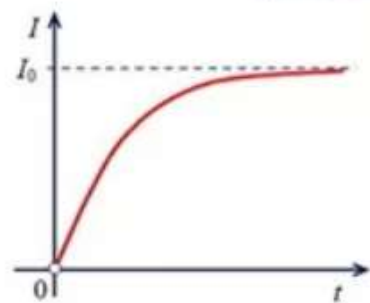
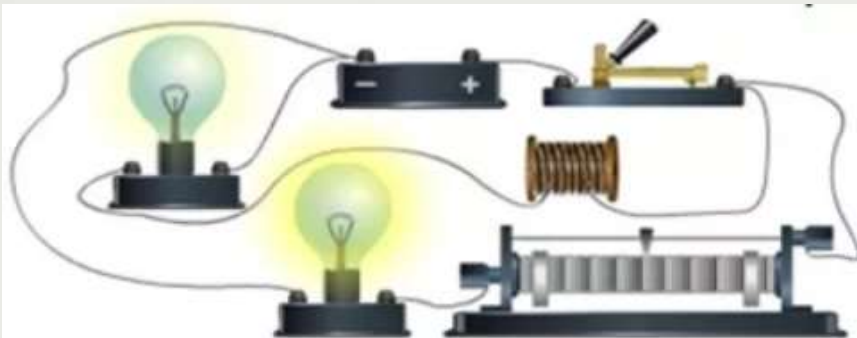
Размыкаем
ключ



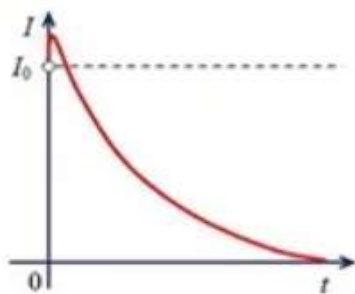
Замыкаем
ключ



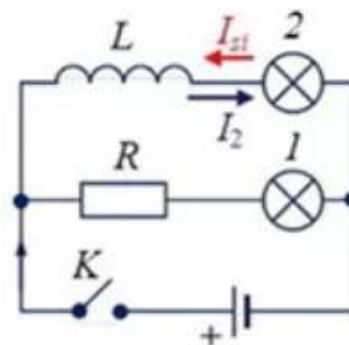
Самоиндукция. Экстратоки



При замыкании ключа



При размыкании ключа



L – индуктивность

$$\Phi = LI$$

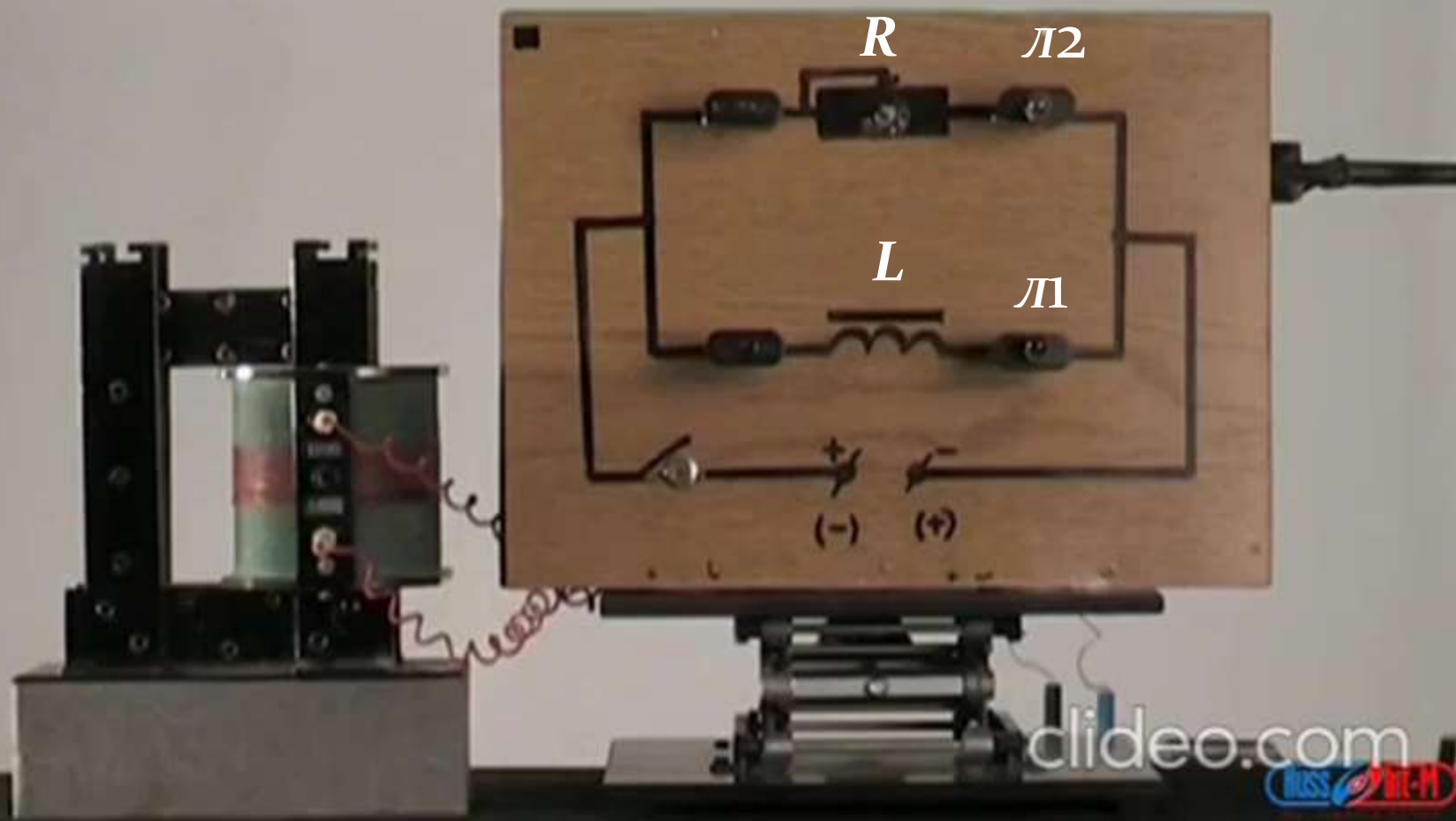
- магнитный поток

$$\mathcal{E}_{si} = -L \frac{dI}{dt}$$

- ЭДС самоиндукции

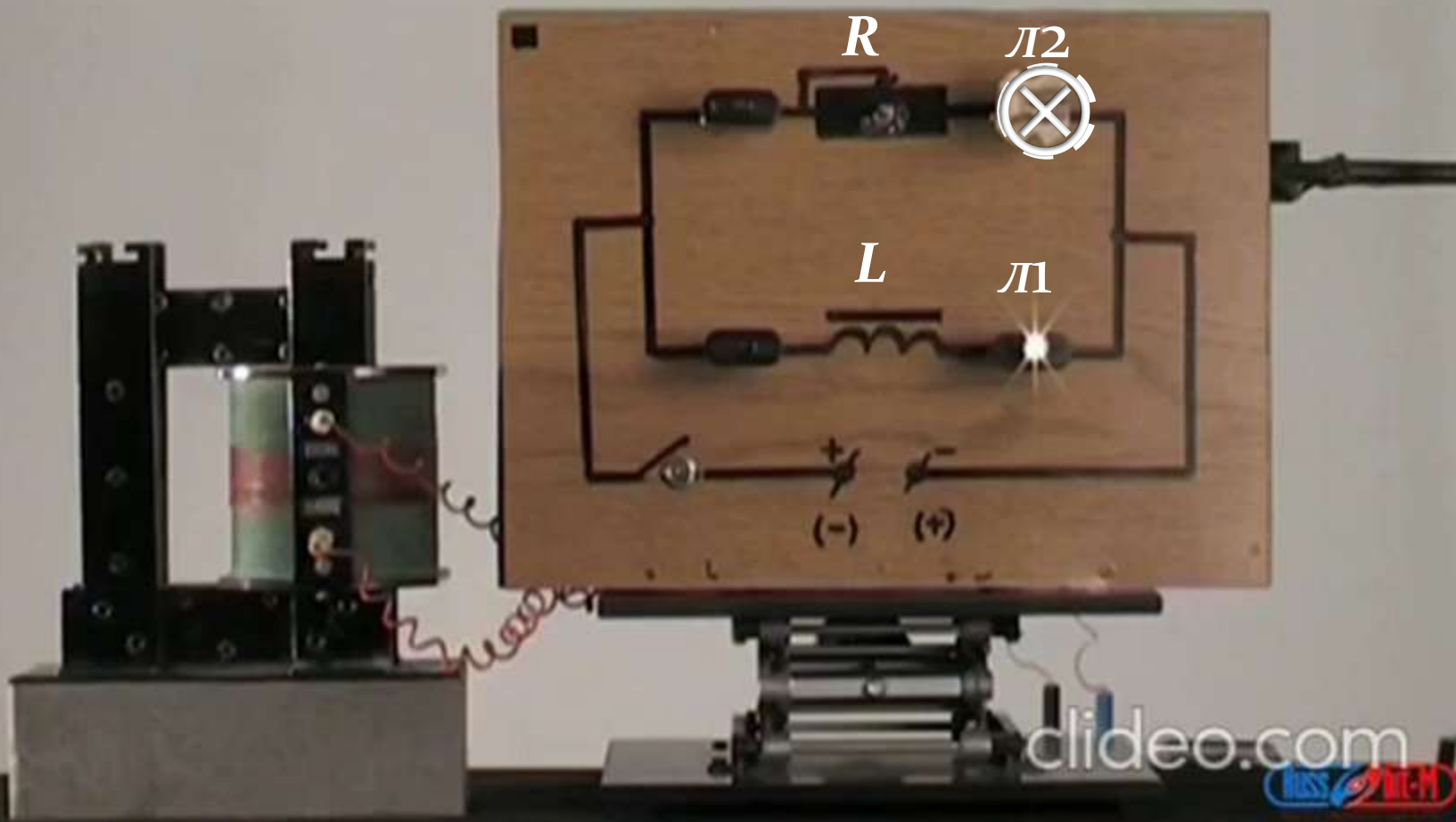
$$W = \frac{LI^2}{2} \quad \text{- энергия магнитного поля}$$

Самоиндукция. Экстратоки

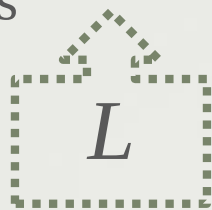


Самоиндукция. Экстратоки

Неоновая лампочка



$\Phi_s \sim I$ ➡ (Опр.) Индуктивность (коэффициент самоиндукции):



$$\left(\frac{1 \text{ Вб}}{1 \text{ А}} = 1 \text{ Гн} \right)$$

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

- 1. Размеры;
- 2. форма;

А ещё ??

- 3. магнитная проницаемость (μ)

$$\Phi_s = L \cdot I \Rightarrow \mathcal{E}_{si} = -L \frac{dI}{dt}$$

Пример. Индуктивность соленоида

1) $B_s = \mu \cdot \mu_0 n I$;  Теорема о циркуляции *)

2) $\Phi_s = N \cdot \mu \mu_0 n I \cdot S = n l \cdot \mu \mu_0 n I \cdot S = \{ \text{с учётом } V = S l \} = \underline{\underline{\mu \mu_0 n^2 V \cdot I}}$

$$L = \mu \mu_0 n^2 V$$

Индуктивность

