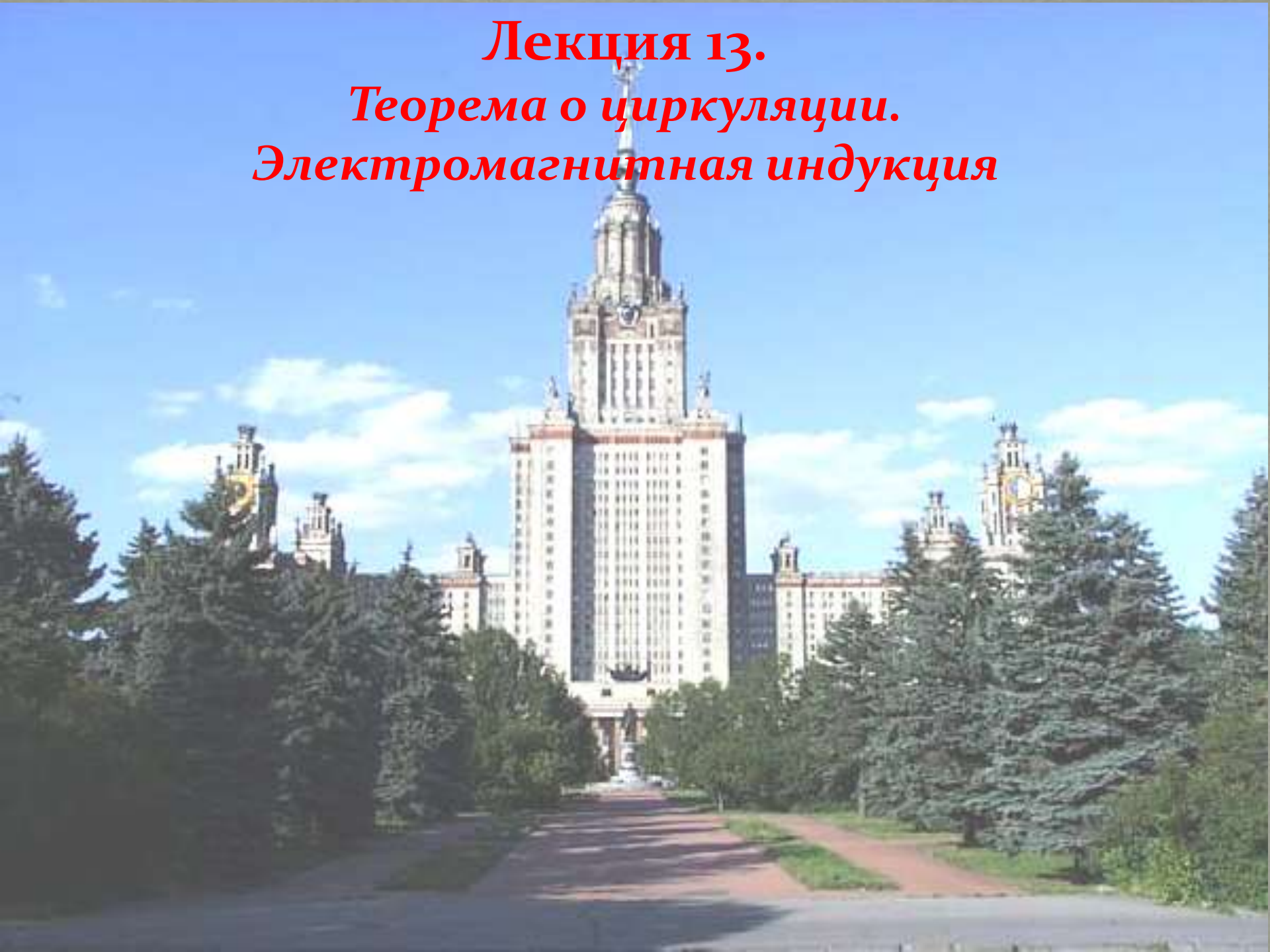


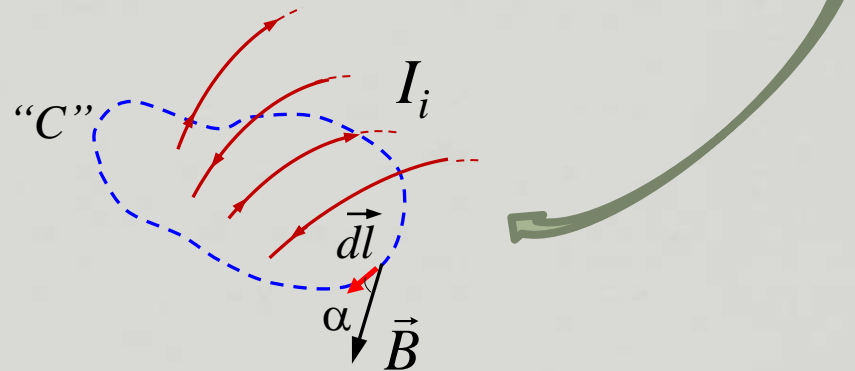
**Лекция 13.**  
**Теорема о циркуляции.**  
**Электромагнитная индукция**



# § 15. Теорема о циркуляции вектора магнитной индукции

## 15.1. Формулировка теоремы

► (Опр.) Циркуляцией вектора (например,  $\vec{B}$ ) по замкнутому контуру "C" называется криволинейный интеграл вида:  $\oint_C (\vec{B}, d\vec{l})$



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

$$\oint_C (\vec{B}, d\vec{l}) = \mu_0 \sum I$$

или

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

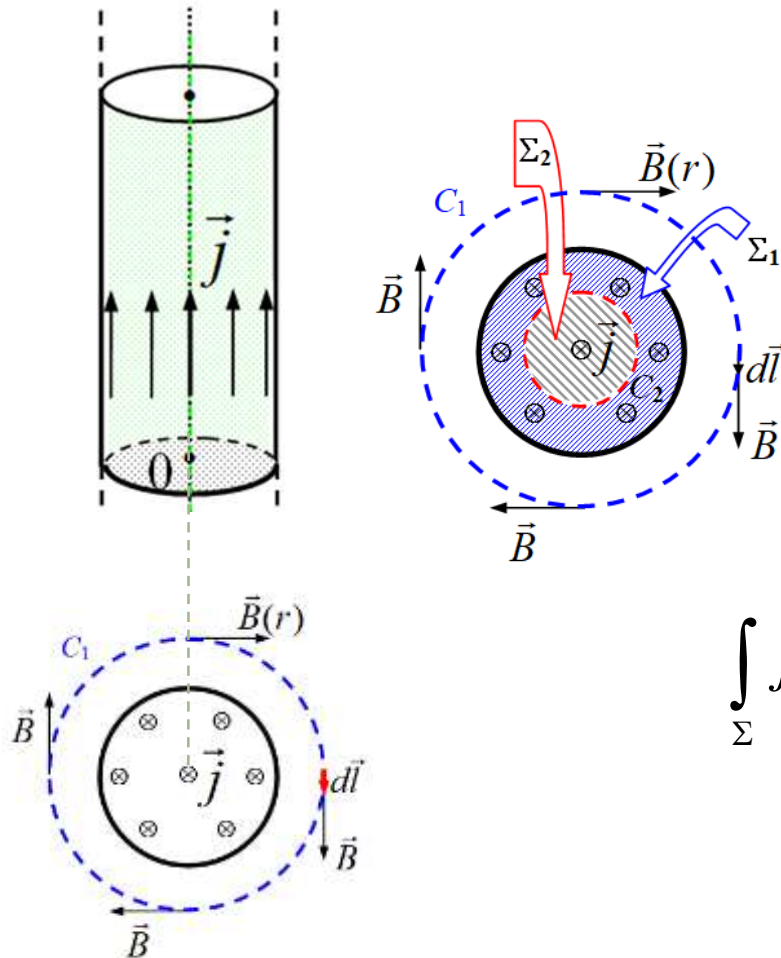
## 15.2. Применение теоремы о циркуляции вектора магнитной индукции

**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:

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

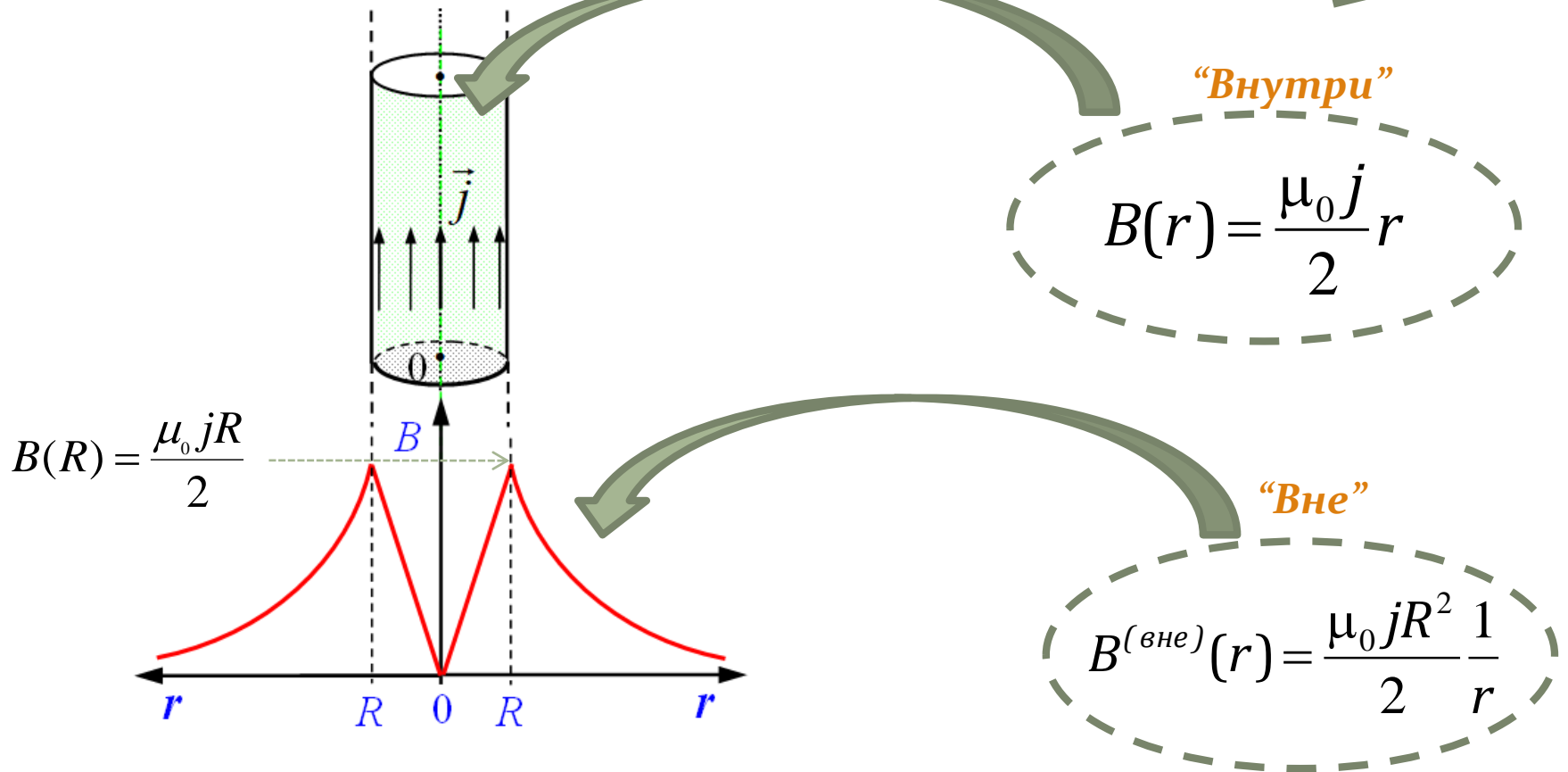
5. “Вычислим” силу тока:

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

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 :



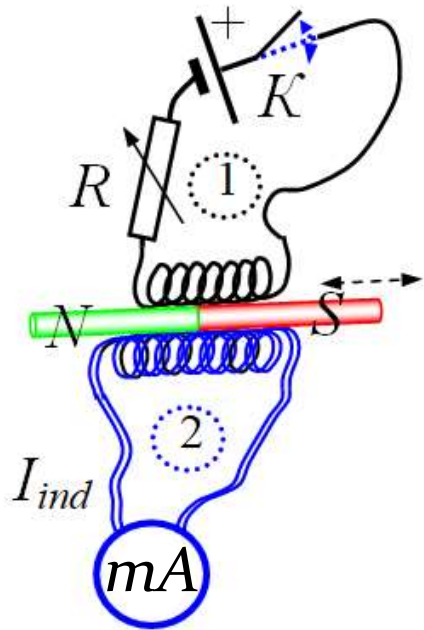
## § 16. Электромагнитная индукция

### 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 через ...

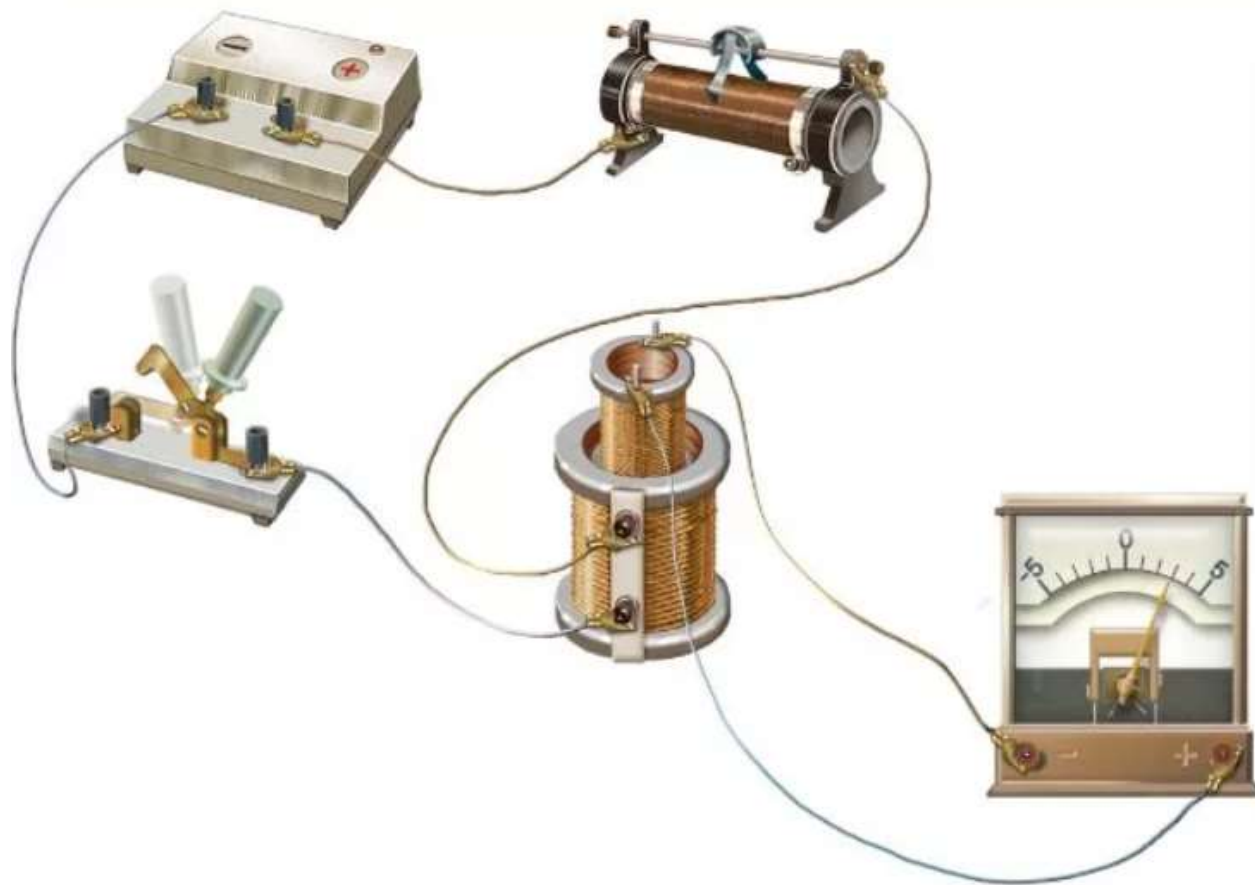
**Фарадей:**

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

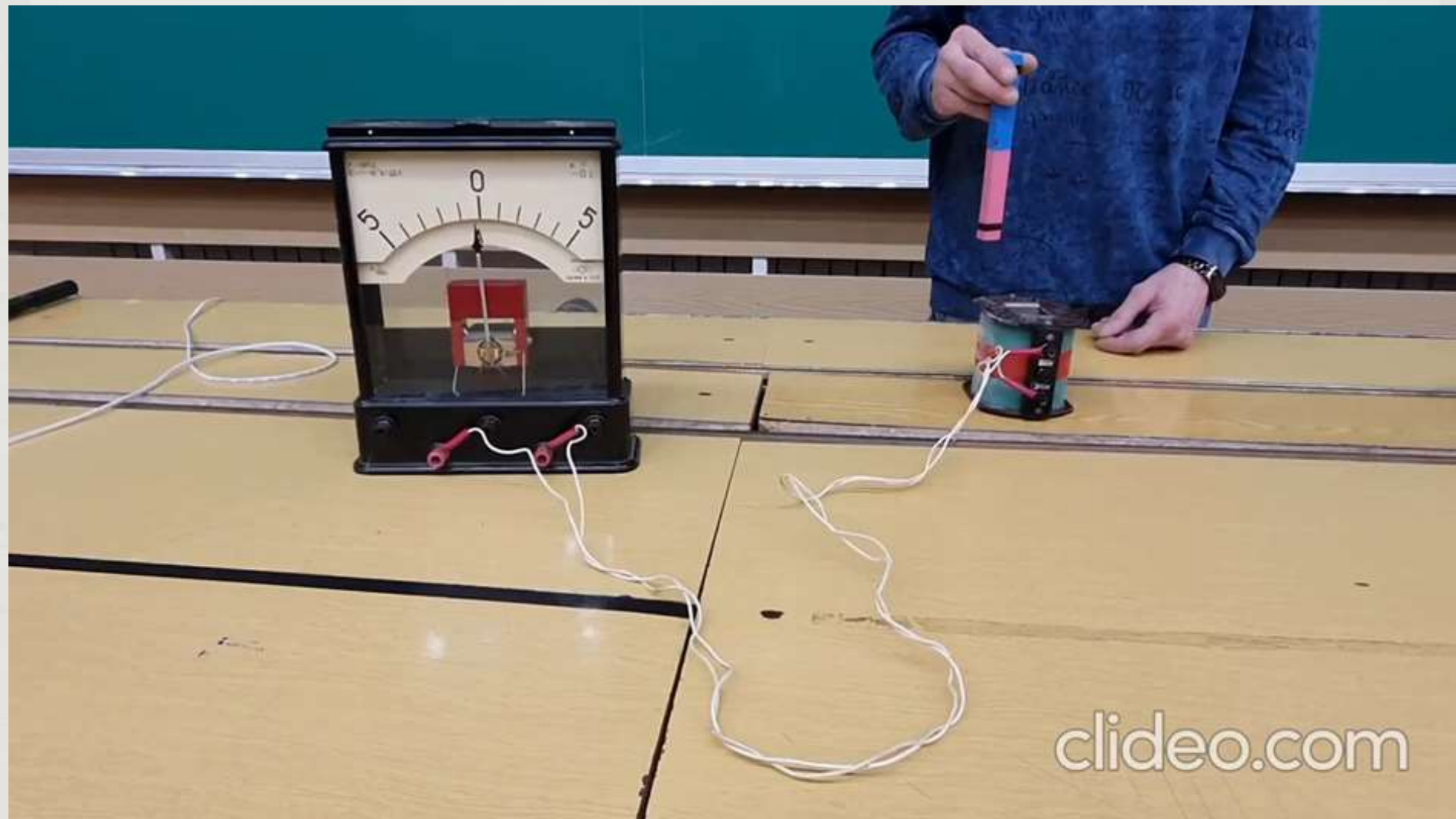
$$I_{ind} \sim \left| \frac{d\Phi_B}{dt} \right|$$

**Закон ЭМИ «по Фарадею»**

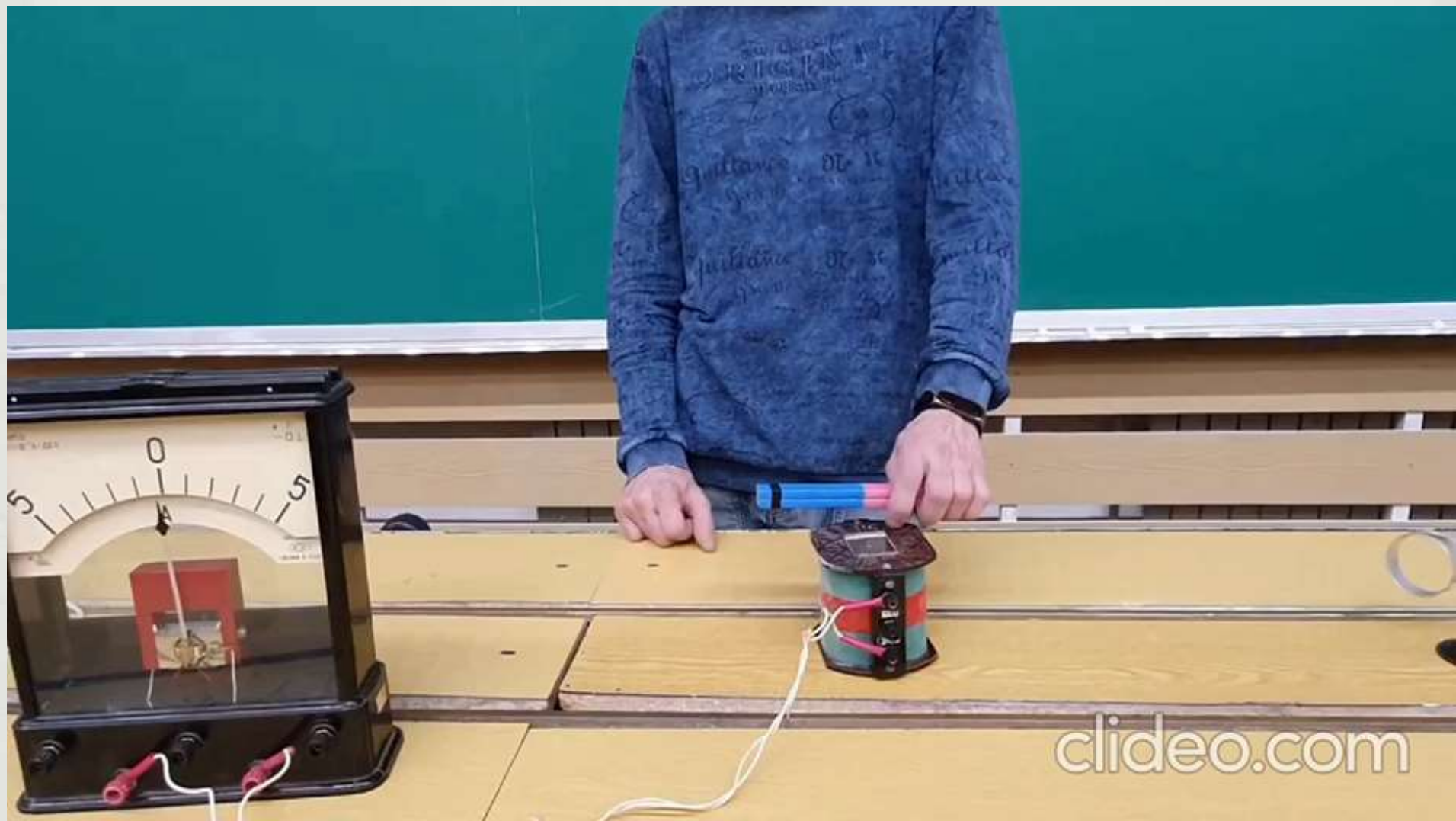
# Опыты Фарадея



## Опыты Фарадея



# Опыты Фарадея



# Опыты Фарадея

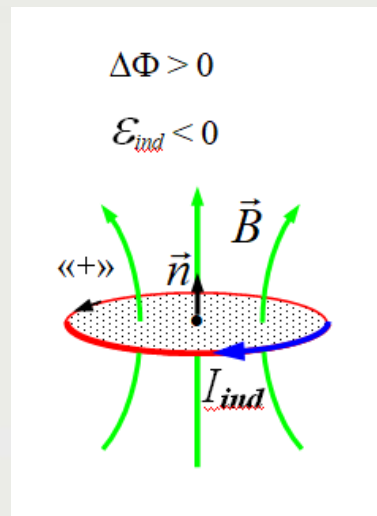
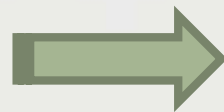


## 16.2. Правило Ленца

• *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:*

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



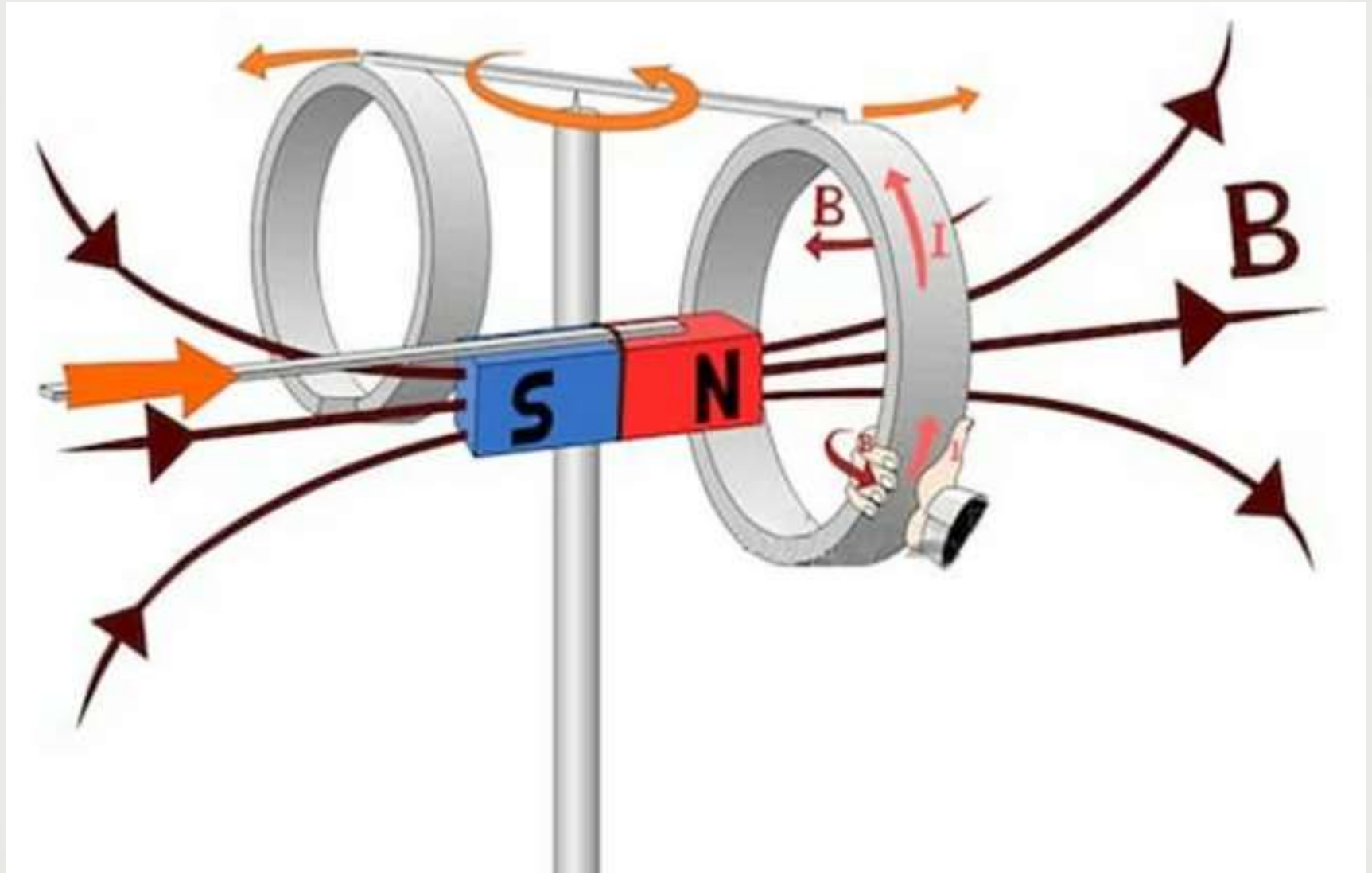
правило Ленца

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

## *Правило Ленца*



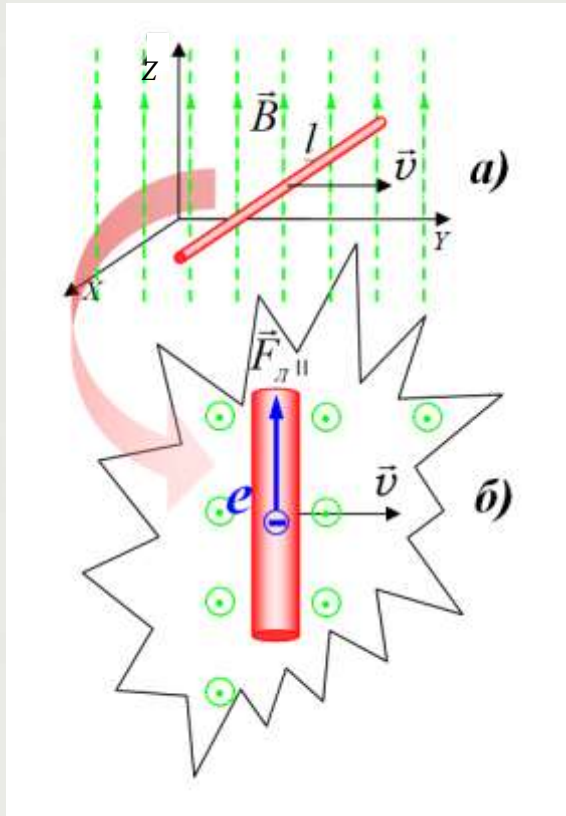
# Правило Ленца



## *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.  
 $v = 72 \text{ км/час}$ ,  $l = 1 \text{ м}$ ,  $B_x = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$ .

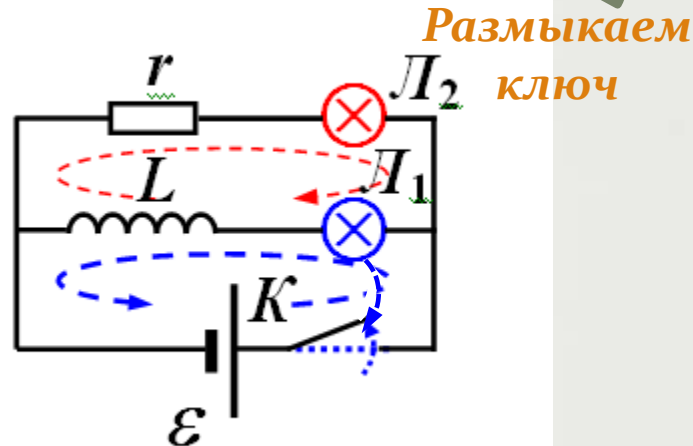
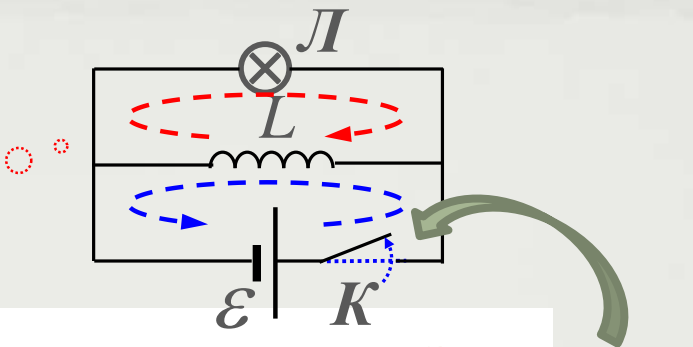
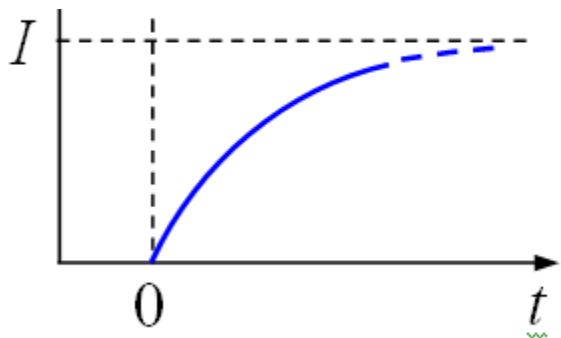
“Антенна автомобиля”:  $\mathcal{E}_{ind} = (20 \text{ м/с}) \cdot (2 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}) \cdot (1 \text{ м}) =$   
 $= 4 \cdot 10^{-4} \text{ В} = 0,4 \text{ мВ}$ .

А крылья самолёта ?

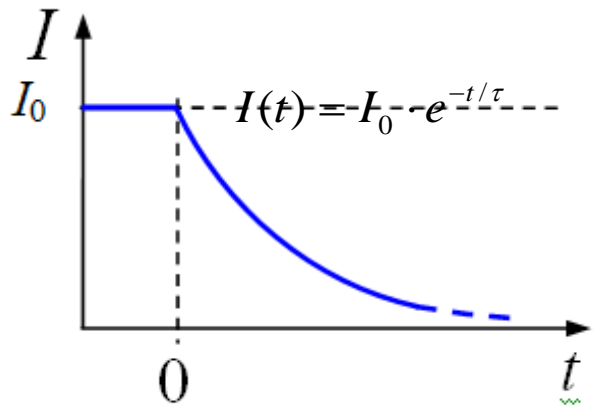
# 16.5. Самоиндукция. Индуктивность

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

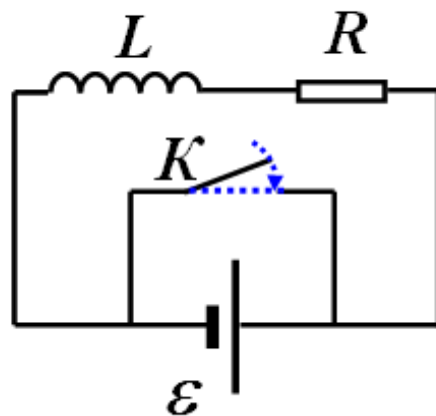
$\Phi_s$  — “собственный” магнитный поток



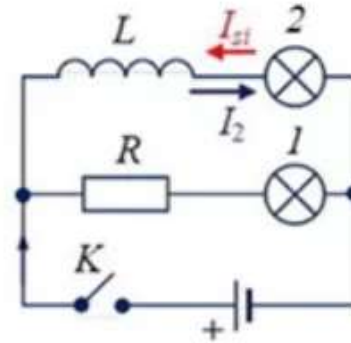
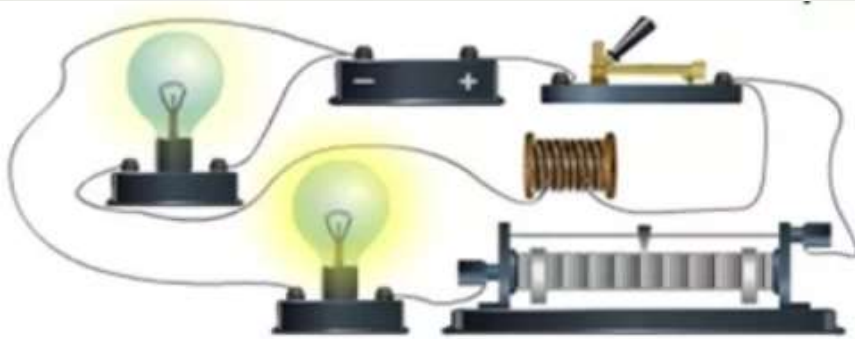
Ещё примеры проявления самоиндукции:



Замыкаем ключ



# Самоиндукция. Экстратоки



$$\Phi = LI$$

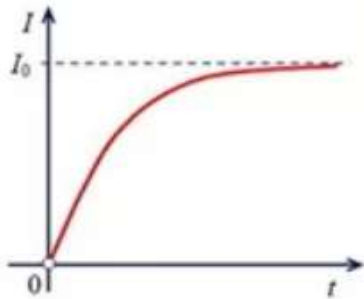
- магнитный поток

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

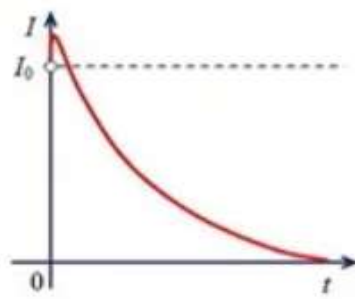
- ЭДС самоиндукции

$L$  - индуктивность

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

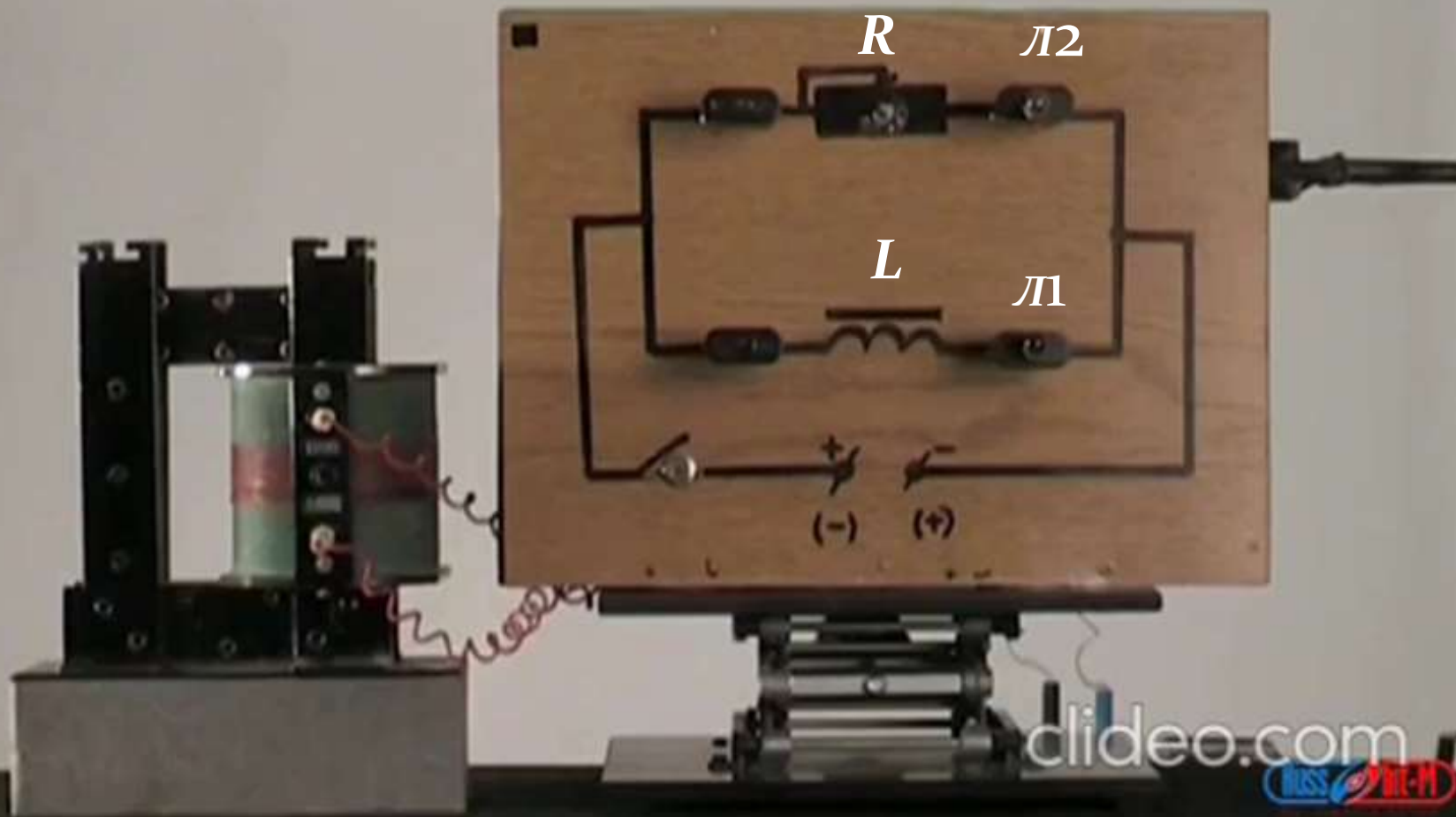


При замыкании ключа



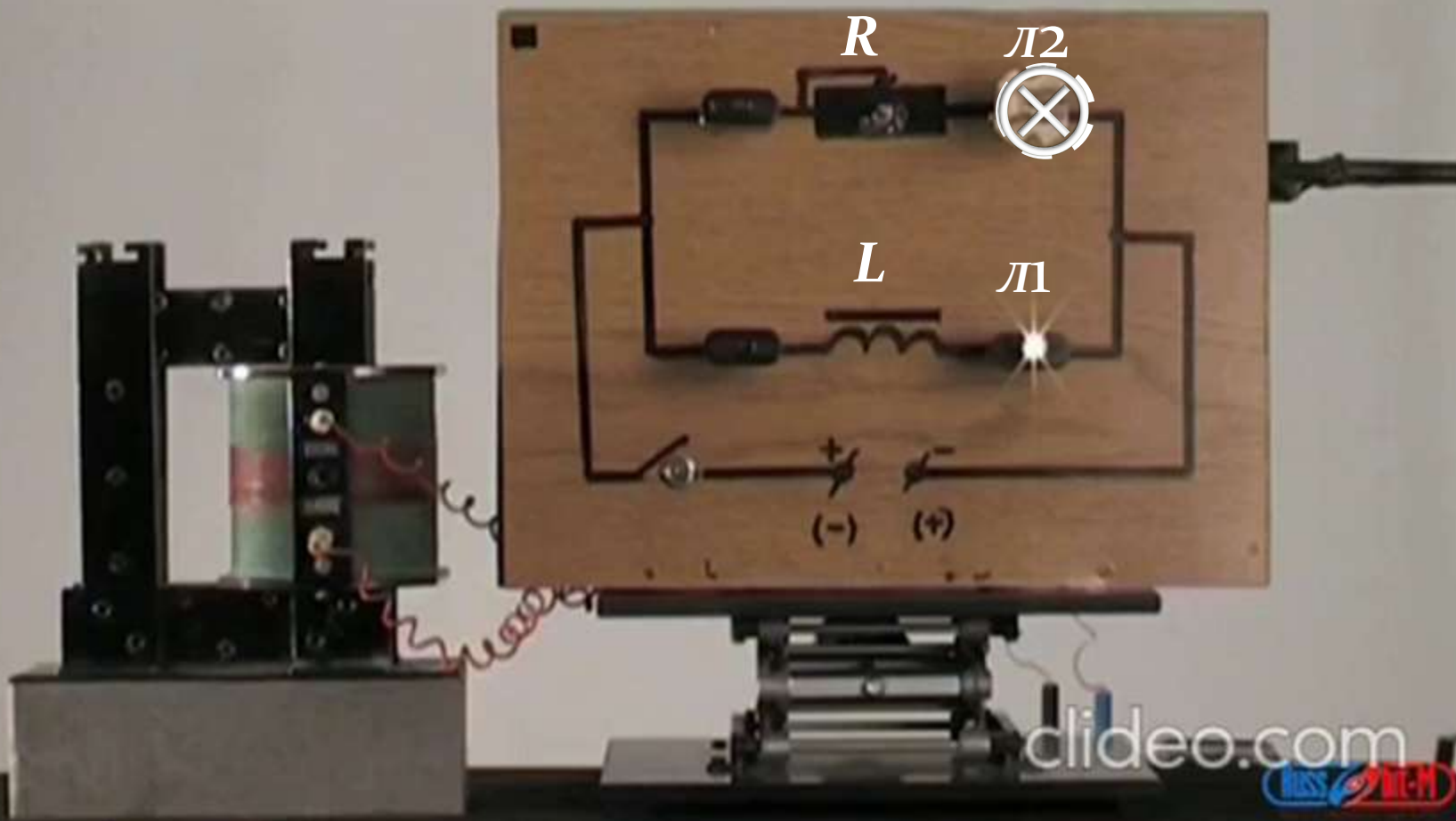
При размыкании ключа

# Самоиндукция. Экстратоки

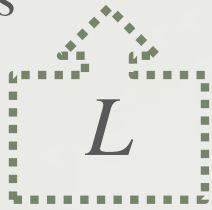


# Самоиндукция. Экстратоки

Неоновая лампочка



$\Phi_s \sim I$   $\rightarrow$  (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 ( $\mu$ )

$$\Phi_s = L \cdot I \Rightarrow$$

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

Пример. Индуктивность соленоида

1)  $B_s = \mu \cdot \mu_0 n I$ ;  $\leftarrow$  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

