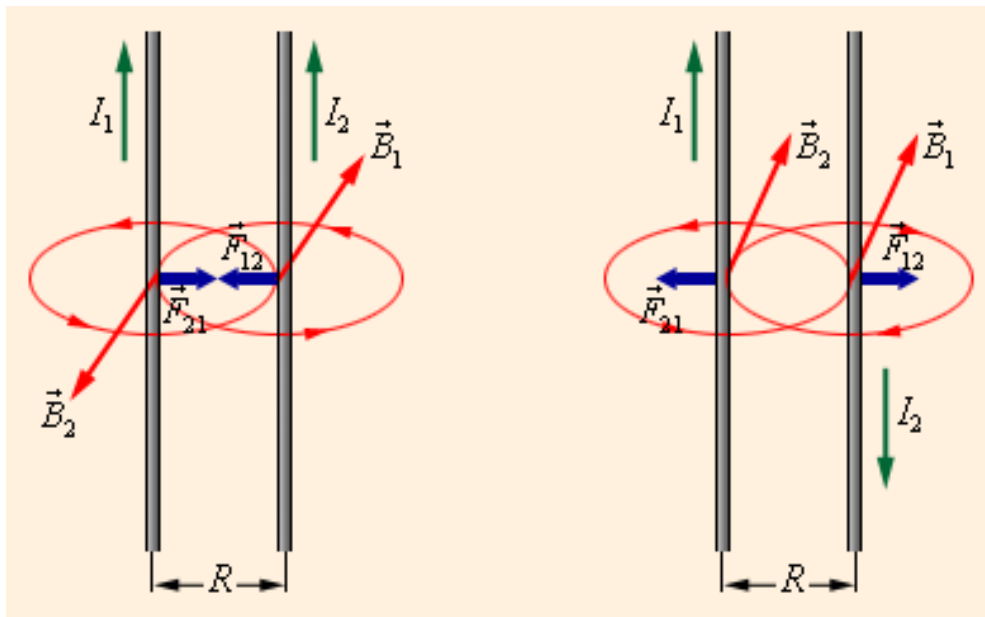


# Взаимодействие между два успоредни проводника с ток

- ✓ Успоредните проводници се привличат или отблъскват когато по тях тече ток.
- ✓ Единия проводник е в магнитното поле на другия /безкрайно дълги проводници/.
- ✓ Един проводник не създава върху себе си и по продължението си магнитно поле



$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi R}; \quad B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi R}$$

$$\frac{F_{12}}{l} = I_2 B_1$$

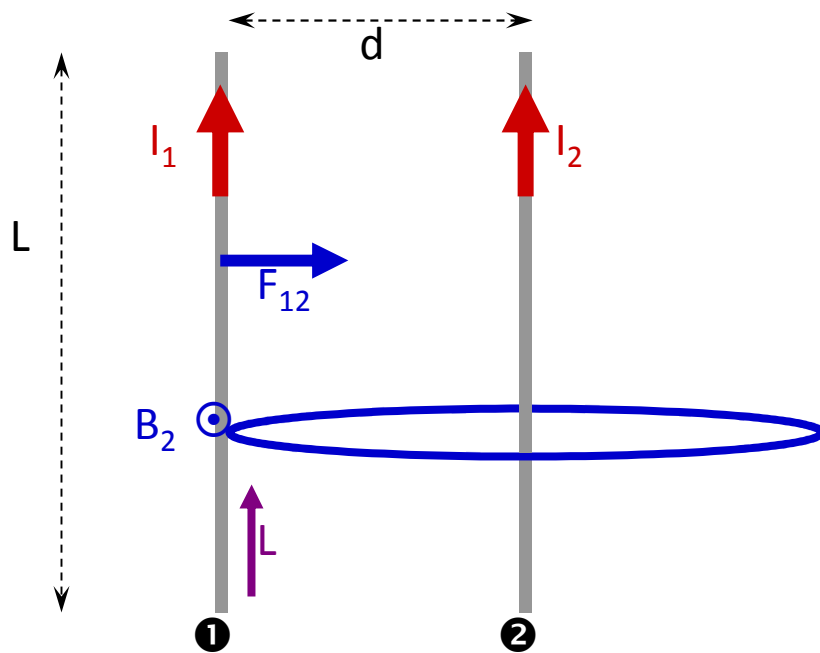
$$\frac{F_{12}}{l} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi R} = -\frac{F_{21}}{l}$$

- ✓ Магнитната сила действаща върху идентичен участък с дължината  $l$  върху всеки от проводниците зависи от токовете и разстоянието между тях.

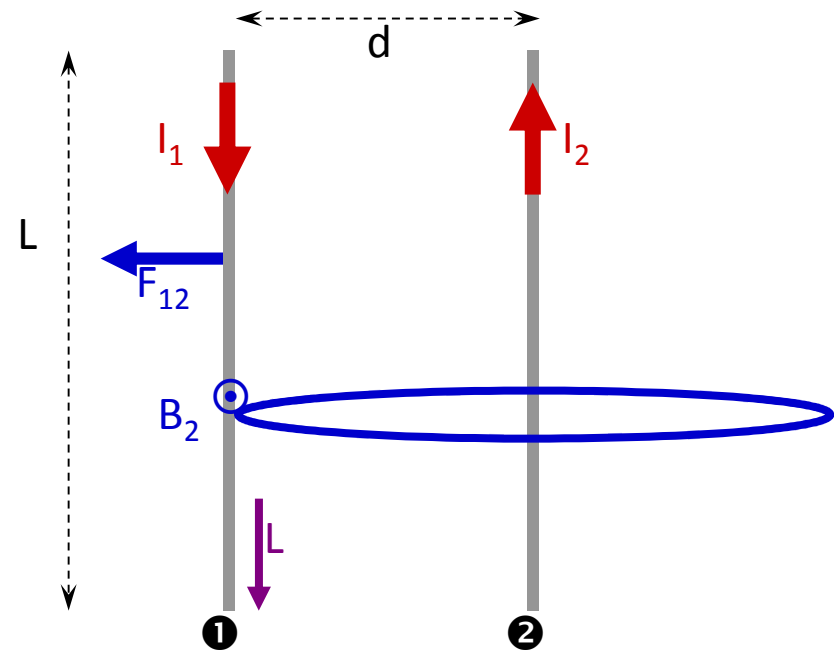
$$F_{12} = -F_{21} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi R} l$$

**Пример:** Разстоянието между 2 успоредни проводника е  $d=20$  см. По тях текат токове с големина  $I_1=5$  А и  $I_2=2.5$  А. Определете големината и посоката на силата, която действа на участък с дължина  $L=1$  m от първия проводник ако:

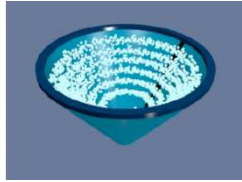
а) Токовете са еднопосочни



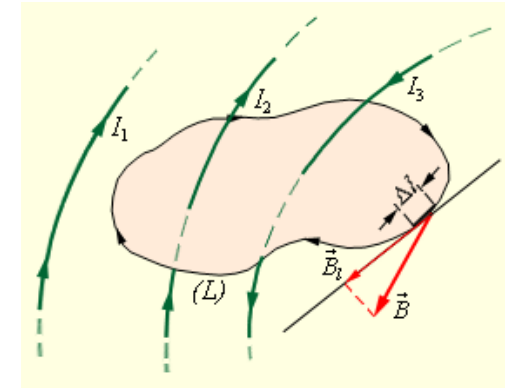
б) Токовете са разнопосочни



# Циркулация на магнитната индукция. Закон на Ампер

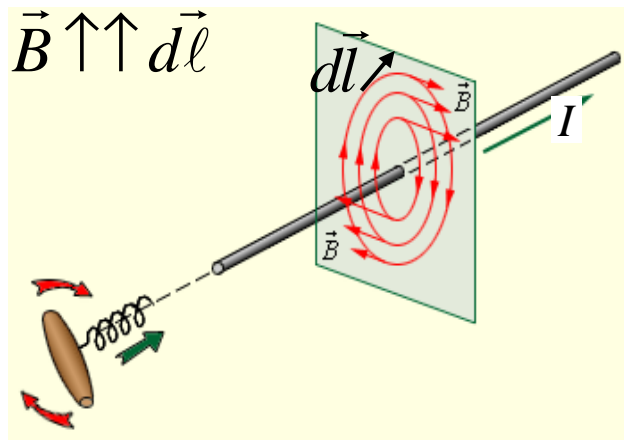


$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum_k I_k$$



Магнитното поле е вихрово, ако  $I_k \neq 0$  за разлика от електричното, което е потенциално!

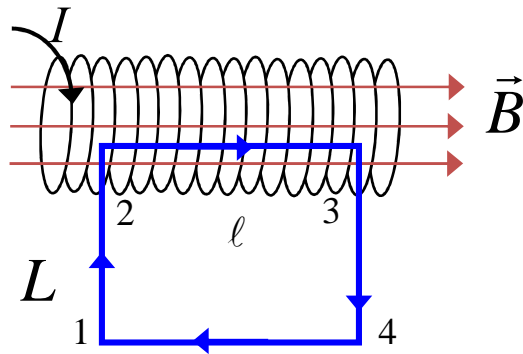
**Приложение :** Определете магнитната индукция създавана от прав безкрайно дълъг прав проводник



$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \oint_L B dl = B \oint_L dl = \mu_0 I$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

## Приложение: Магнитно поле в безкраен соленоид.



посока на обикаляне на контура

$$\left\{ \begin{array}{l} n = \frac{N}{l} \text{ - брой навивки на 1 м} \\ \text{дължина от соленоида} \\ \sum_{k=1}^N I_k = IN = Inl \end{array} \right\}$$

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 \sum_{k=1}^N I_k$$

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \int_1^2 \vec{B} \cdot d\vec{\ell} + \int_2^3 \vec{B} \cdot d\vec{\ell} + \int_3^4 \vec{B} \cdot d\vec{\ell} + \int_4^1 \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = Bl$$

$\boxed{=0}$ 
 $\boxed{=0}$ 
 $\boxed{\approx 0}$

$$\Rightarrow Bl = \mu_0 \sum_{k=1}^N I_k$$

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I = \mu_0 n I$$

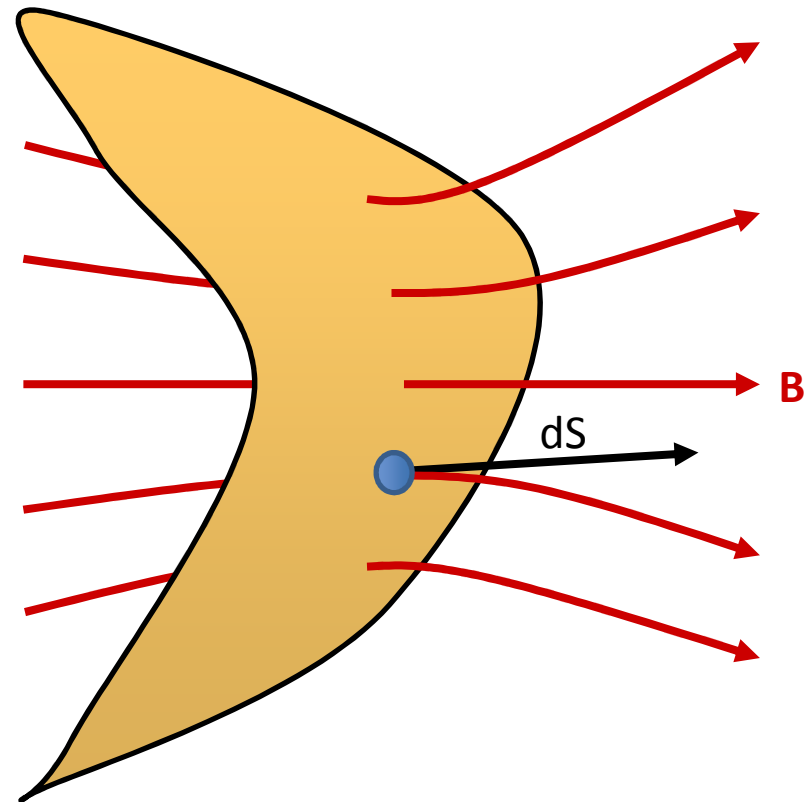
**Пример:** По соленоид съдържащ 2000 навивки с дължина 30 см, протича ток с големина 100 А. Колко е магнитната индукция в соленоида?

## Поток на магнитната индукция и закон на Гаус

✓ **Магнитен поток през отворена повърхност:**

$$\Phi_B = \lim_{\Delta S_i \rightarrow 0} \sum_i \vec{B}_i \cdot \Delta \vec{S}_i$$

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

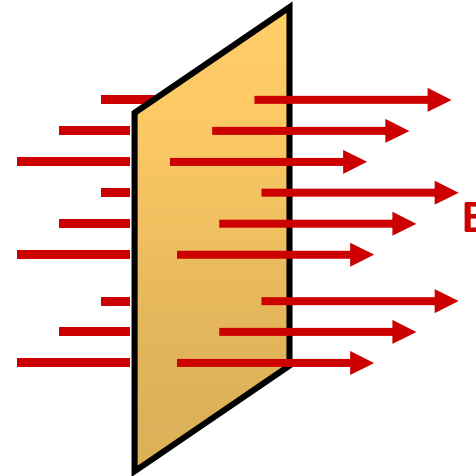


## Поток на магнитната индукция и закон на Гаус

- ✓ **Магнитен поток през плоска отворена повърхност:**

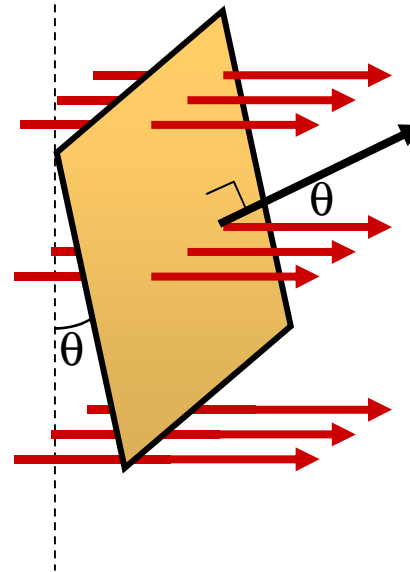
$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{S}$$

$$\Phi_B = BS$$



$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{S}$$

$$\Phi_B = BS \cos(\theta)$$

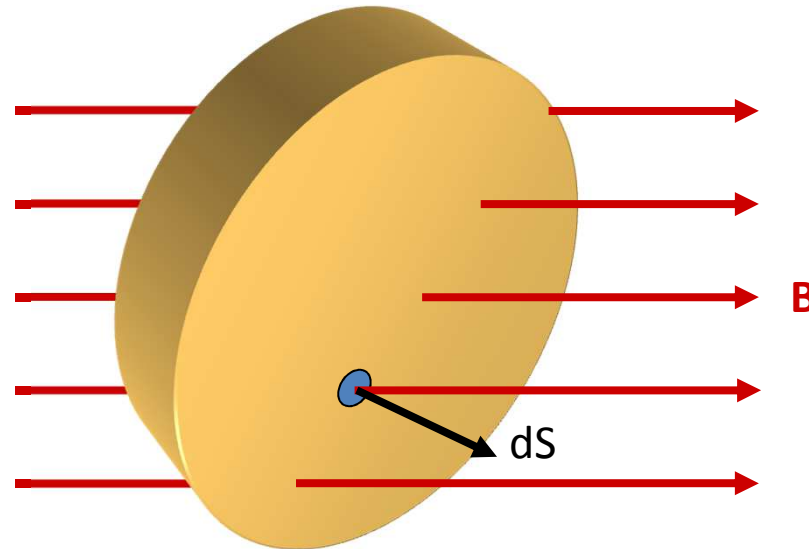


## Поток на магнитната индукция и закон на Гаус

Закон на Гаус за магнитното поле:

Магнитният поток през произволна **затворена повърхност** е нула

$$\Phi_B = \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

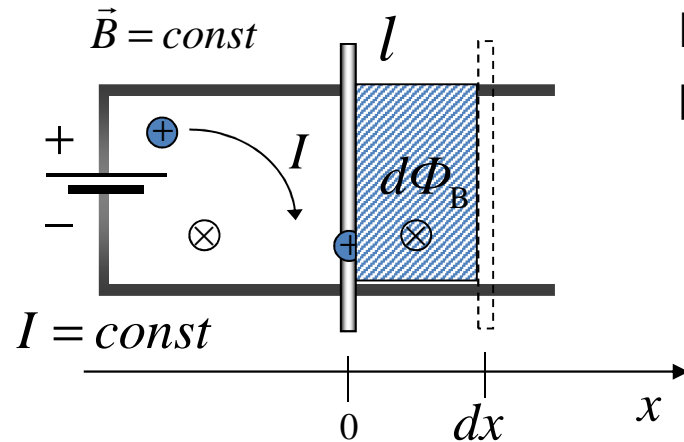


Закопи на Гаус за електрично и магнитно полета:

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q_{enclosed}}{\epsilon_0}$$

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

# Работа за преместване на проводник с ток в магнитно поле



Работата за преместване на проводника на разстояние  $dx$  е равна на:

$$\delta A = F dx = IB l dx \quad l dx = dS; \quad B dS = d\Phi_B$$

$$\delta A = I d\Phi_B$$

Работата за преместване на проводника на крайно разстояние

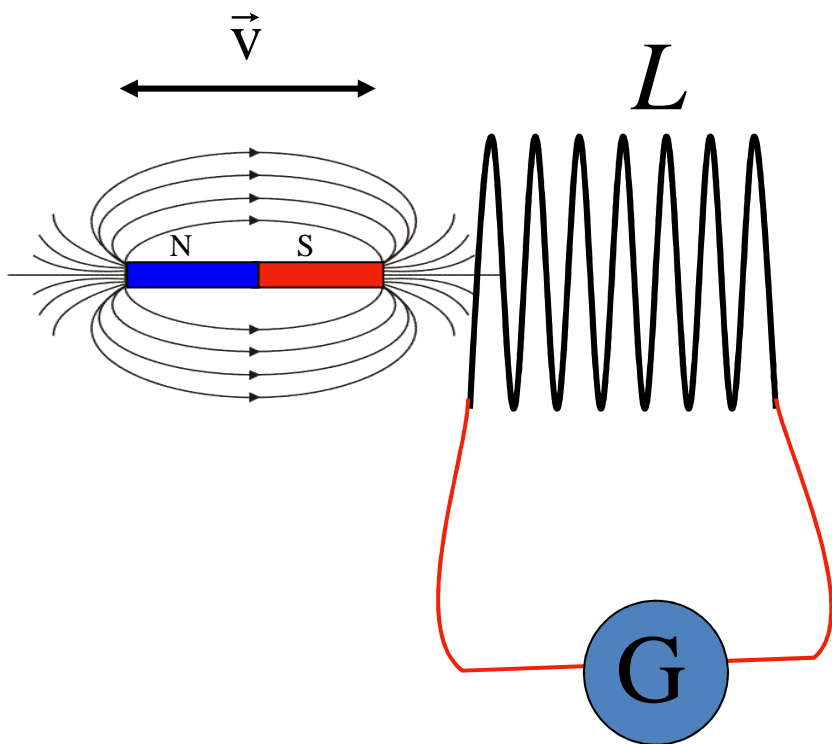
$$A = \int_{\Phi_1}^{\Phi_2} I d\Phi_B = I(\Phi_2 - \Phi_1)$$

$$A = I \Delta \Phi_B$$



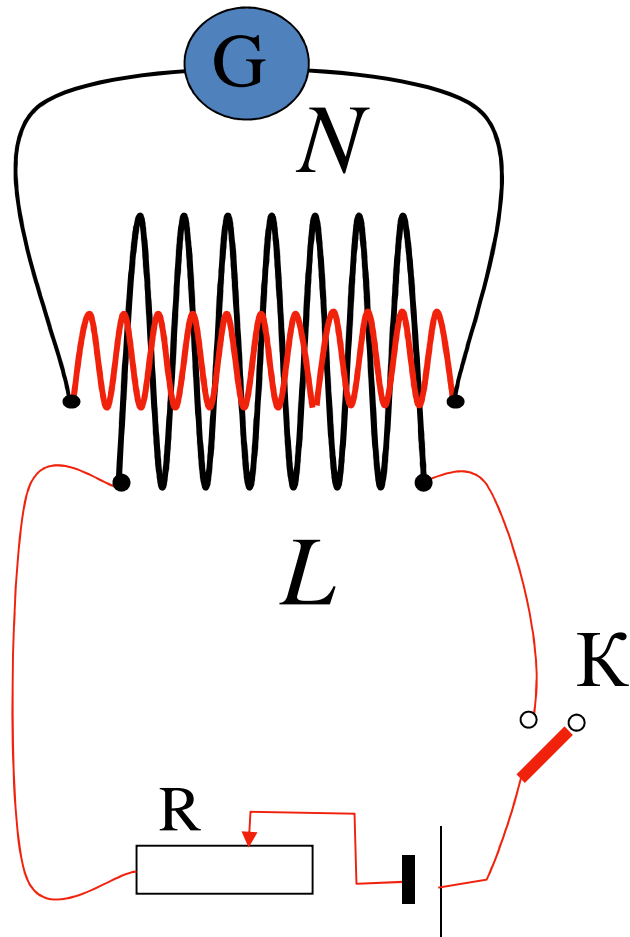
# 1. Закон на Фарадей за електромагнитната ИНДУКЦИЯ.

**Опит 1.** Индуциране на ЕДН в проводник при промяна на магнитния поток, създаван от постоянен магнит.



Посоката на отклонението на стрелката на галванометъра зависи от посоката на движение на магнита, а големината на отклонението е пропорционална на скоростта на движение на магнита.

**Опит 2.** Индуциране на ЕДН в проводник при промяна на магнитния поток, създаван от променлив ток, течащ в друг проводник (взаимна индукция).



- При включване и изключване на **К**, стрелката на **G** се отклонява в различни посоки.

- При промяна на тока в намотката чрез **R** стрелката отново се отклонява, като отклонението ѝ зависи от посоката на тока и скоростта с която движим плъзгача на реостата.

- Ако токът е постоянен, стрелката не се отклонява.

## Закон на Фарадей за електромагнитната индукция

Промяната на магнитният поток през контур с  $N$  на брой намотки индуцира в него електродвижещо напрежение ( $\varepsilon$ ):

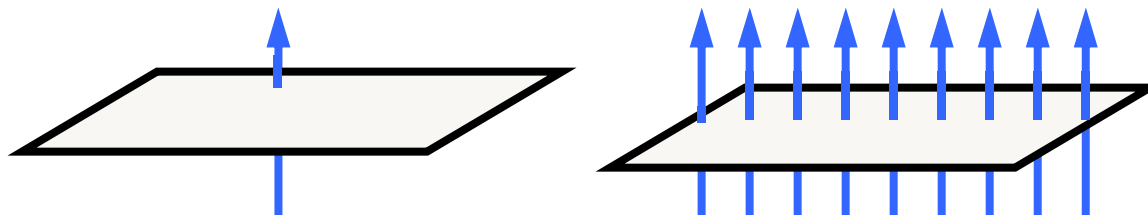
$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi_B}{dt}$$

А защо знака е минус ...

Начини да се индуцира ЕДН (чрез промяна магнитния поток):

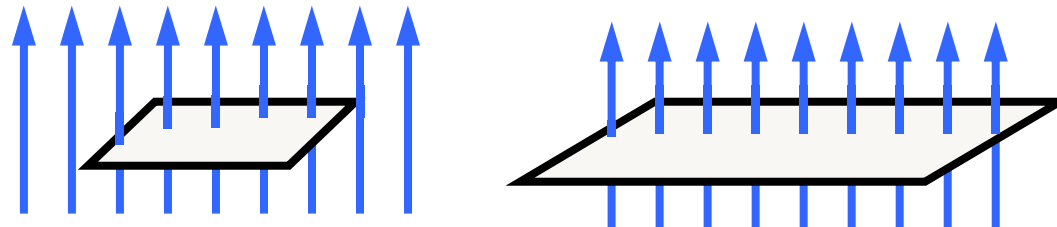
- промяна на  $B$

$$d\Phi_B = SdB$$



- промяна на площта на контура в полето

$$d\Phi_B = BdS$$

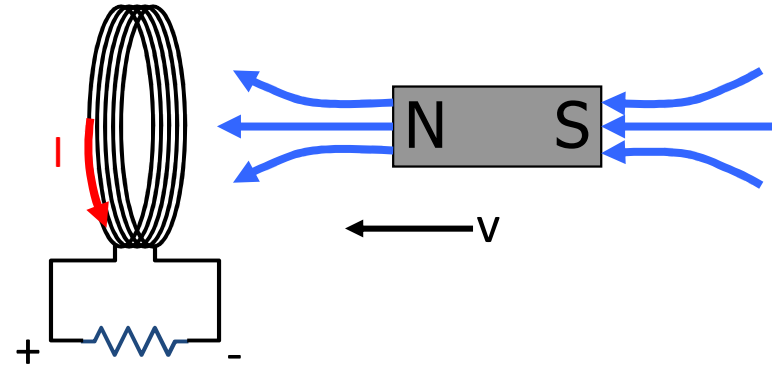


## Пример: движение на магнит през намотка с ток.

$$N=5 \text{ turns} \quad A=0.002 \text{ m}^2$$

$$\frac{dB}{dt} = 0.4 \text{ T/s}$$

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi_B}{dt} = -N \frac{d\int \vec{B} \cdot d\vec{S}}{dt}$$



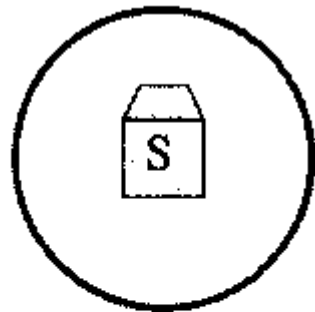
$$\varepsilon = -N \frac{d(BS)}{dt} \quad (\text{какво направихме тук?})$$

$$\varepsilon = -NS \frac{dB}{dt}$$

$$\varepsilon = -5 (0.002 \text{ m}^2) \left( 0.4 \frac{\text{T}}{\text{s}} \right) = -0.004 \text{ V}$$

## Практика с правилото на Ленц.

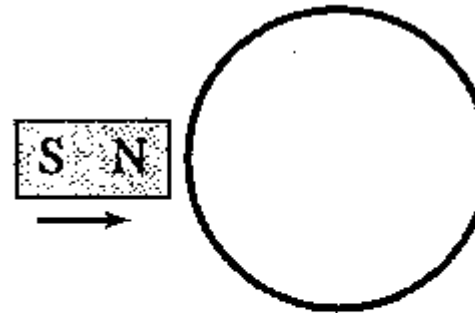
В коя посока ще е индуцираният ток в случаите по-долу?



(a)

N magnetic pole  
moving toward coil  
from above the page

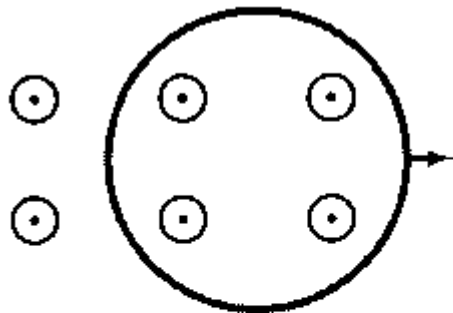
(counterclockwise)



(b)

N magnetic pole moving  
toward the coil in the plane  
of the page

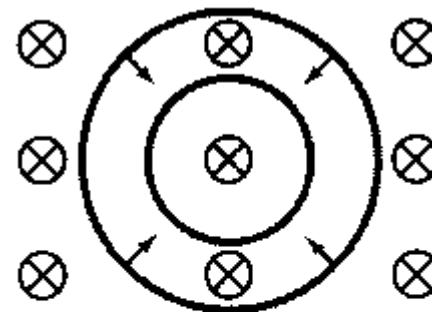
(no current)



(c)

Pulling the coil to the right  
out of a magnetic field  
that points out of the page

(counterclockwise)



(d)

Shrinking a coil in a  
magnetic field pointing  
into the page

(clockwise)

# Самоиндукция

Явление при което промяната на тока в един проводник индуцира ЕДН в същия проводник се нарича самоиндукция

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -L \frac{dI}{dt}$$

✓ Единицата за индуктивност се нарича Хенри:

$$L = -\frac{\varepsilon}{dI/dt}, \left[ H = \frac{V \cdot s}{A} \right]$$

✓ Индуктивността е количествена характеристика на инертността на намотката.

**Пример:** Токът през намотка с индуктивност  $L=0.5$  Н намалява **равномерно** от  $I_1=10$  А до  $I_2=2$  А за 0.1 сек. Определете самоиндуцираното ЕДН.

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

# Самоиндукция в намотка с N на брой навивки

Самоиндукцията контур с N на брой навивки се определя също чрез закона на Фарадей

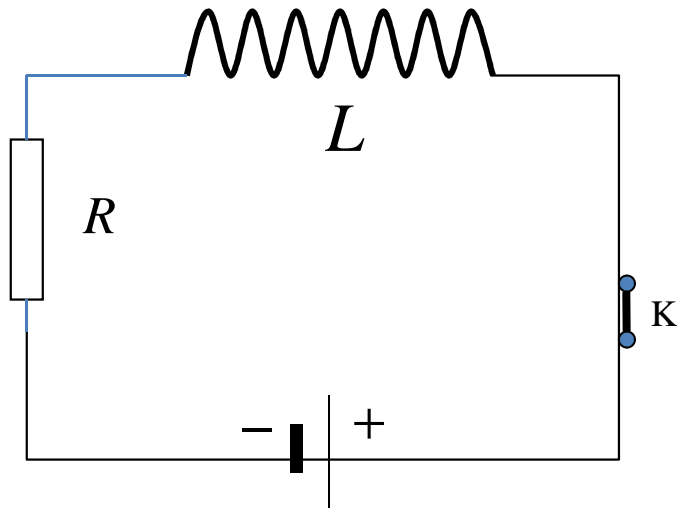
$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi_B}{dt} = -L \frac{dI}{dt}$$

$$L = \frac{N\Phi_B}{I}$$

**Пример:** По соленоид със сечение  $5\text{cm}^2$  тече ток с големина 2A. Ако соленоида има 1200 навивки и индукцията на магнитното поле по оста му е 0.01 T, определете индуктивността на соленоида.



# Енергия на магнитното поле (R-L верига)



$$\left( \varepsilon = RI + L \frac{dI}{dt} \right) * Idt$$

$$\varepsilon Idt = RI^2 dt + LI dI$$

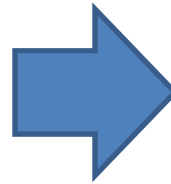
$$\delta Q = RI^2 dt \quad dW_B = LI dI$$

L определя количеството магнитна енергия, което може да се запаси в дадена намотка.

$$W_B = \int_0^I LI dI = \frac{LI^2}{2}$$

$$L = \frac{\mu_0 N^2 S}{l}$$

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I$$



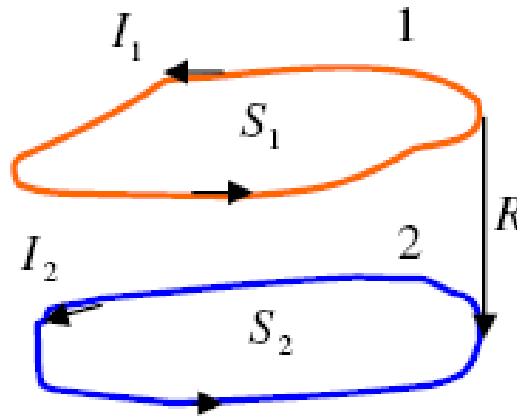
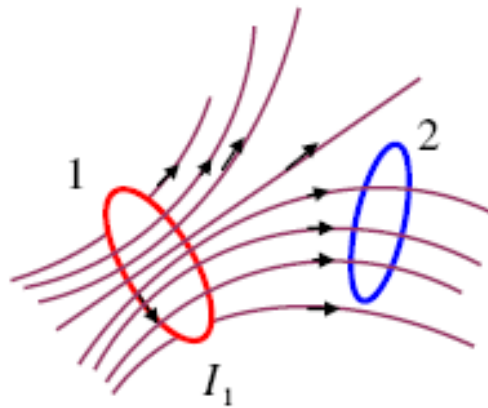
Енергия на магнитното поле

$$W_B = \frac{B^2}{2\mu_0} Sl$$

Плътност на енергията

$$w_B = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

# Взаимна индукция



$$\Phi_{12} = B_1 S_2$$

$$\Phi_{12} = M_{12} I_1$$

$$\Phi_{21} = B_2 S_1$$

$$\Phi_{21} = M_{21} I_2$$

Индукцирането на ток в проводник при изменението на тока в друг проводник се нарича **взаимна индукция**.

Двата проводника се наричат “**свързани**”.

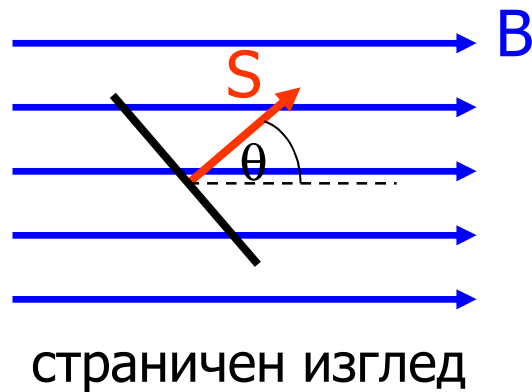
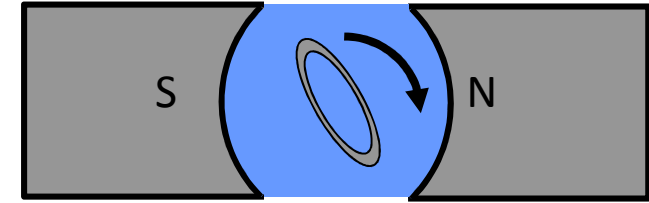
**$M$  - Взаимна индуктивност**     **[H]**     **1H = 1Wb/A**

$$\varepsilon_{12} = -M_{12} \frac{dI_1}{dt}$$

$$\varepsilon_{21} = -M_{21} \frac{dI_2}{dt}$$

## Приложение на закона на Фарадей

Пример: Токов контур в магнитно поле се върти с кръгова скорост  $\omega$ . Какво е индуцираното ЕДН?



$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{S} = BS \cos(\theta)$$

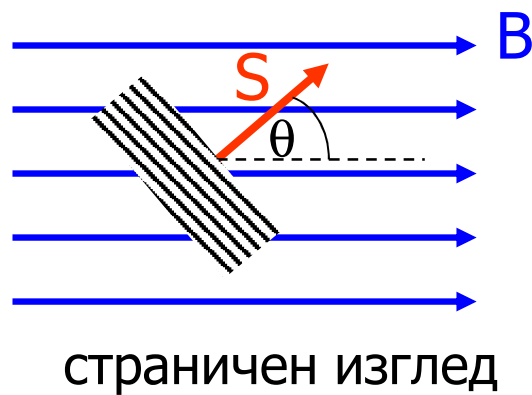
Избираме  $\theta_0 = 0$ . Тогава

$$\theta = \theta_0 + \omega t = \omega t.$$

$$\Phi_B = BS \cos(\omega t)$$

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi_B}{dt} = - \frac{d(BS \cos(\omega t))}{dt}$$

$$\varepsilon = BS \omega \sin(\omega t)$$



Ако имаме  $N$  намотки

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\varepsilon = -N \frac{d(BS \cos(\omega t))}{dt}$$

$$\varepsilon = NBS \omega \sin(\omega t)$$

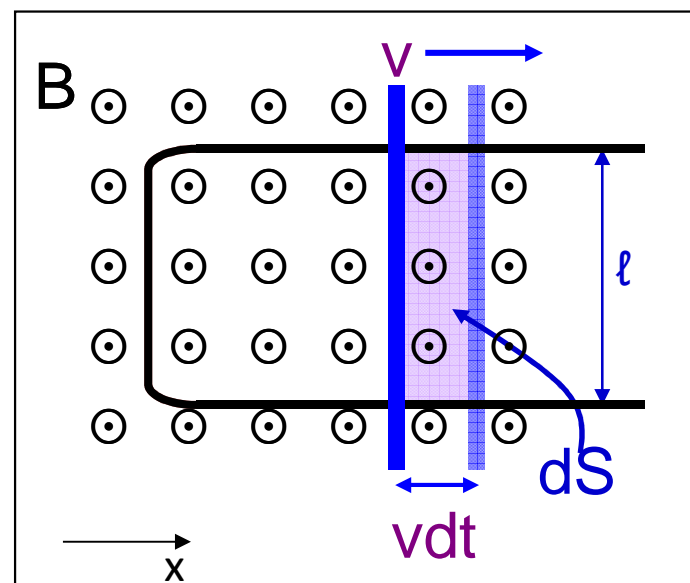
$|\varepsilon|$  е максимум когато  $\theta = \omega t = 90^\circ$  or  $270^\circ$ ; т.е, когато  $\Phi_B$  е нула. Скоростта с която магнитният поток се променя тогава е максимум. От друга страна,  $\varepsilon$  е нула когато магнитният поток има максимум.

## Движение на проводник в магн. поле, чрез закона на Фарадей

Начин за индуциране на ЕДН е промяна на площта на затворения контур в м.п. Нека да видим как това работи.

U-образен проводник и подвижен проводящ прът затварящ контура са поставени в м.п.

Пръта се движи надясно с постоянна скорост  $v$  за време  $dt$ .



Пръта изминава разстояние  $vdt$  и площта заградена от затворения контур се увеличава с:

$$dS = l v dt .$$

Контур е перпендикулярен на м.п., така че магн. поток през контура е  $\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{S} = BS$ . ЕДН-то пресмятаме по закона на Фарадей.

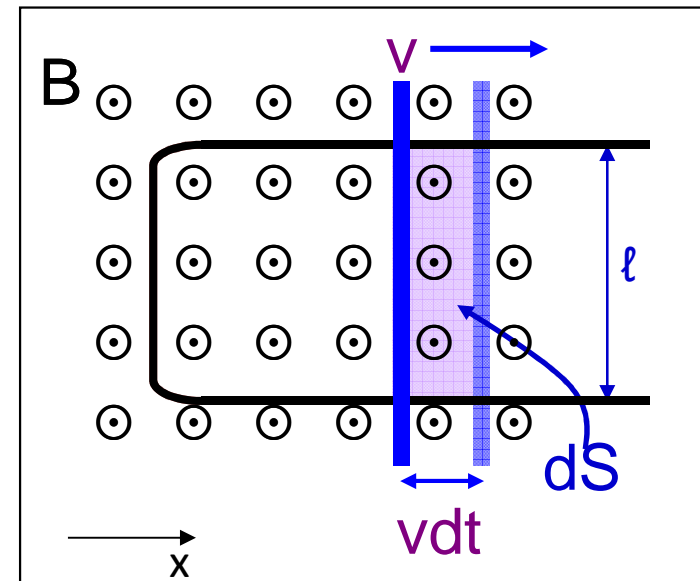
$$|\mathcal{E}| = \left| -N \frac{d\Phi_B}{dt} \right|$$

$$|\mathcal{E}| = \left| 1 \frac{d(BS)}{dt} \right|$$

$$|\mathcal{E}| = \left| \frac{B dS}{dt} \right|$$

$$|\mathcal{E}| = \left| B \ell \frac{dx}{dt} \right|$$

$$|\mathcal{E}| = B \ell v .$$

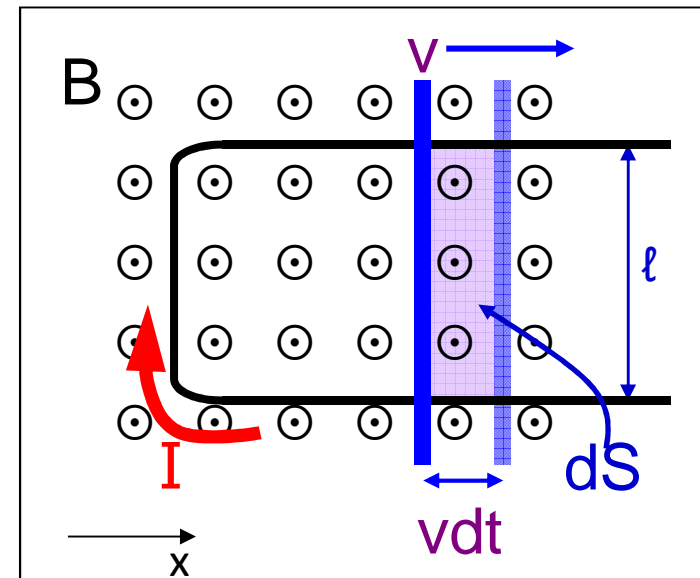


## А посоката на тока?

Индуцираното ЕДН води до възникването на ел. ток.

Магнитния поток нараства (по-голяма площ).

Токът трябва да възпрепятства нарастването на магнитния поток (правилото на Ленц)



По часовниковата стрелка!

## Движение на проводник в магнитно поле .. още един извод

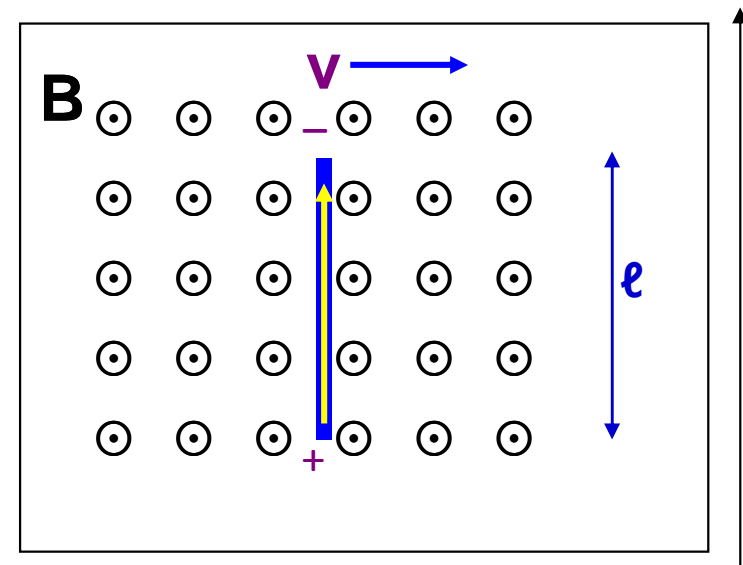
Разделените заряди в пръта създават електрично поле. Така ЕДН по проводника е:

$$\varepsilon = E l$$

Електричното поле действа със сила:

$$\vec{F}_E = q\vec{E} = -e\vec{E}$$

Равновесие имаме когато електричната и магнитната сила са равни по големина и противоположни по посока.



$$evB = eE = e \frac{\varepsilon}{l}$$

$$\Rightarrow \varepsilon = Blv$$