

# **38. ЕЛЕКТРОМАГНИТНА ИНДУКЦИЯ.**

**ОПИТИ НА ФАРАДЕЙ.**

**ЗАКОН НА ФАРАДЕЙ.**

**ПРАВИЛО НА ЛЕНЦ.**

**ЕЛЕКТРОДВИЖЕЩА СИЛА И  
ИНДУЦИРАНО ЕДН.**

**ВИХРОВО ЕЛЕКТРИЧНО ПОЛЕ.**

**САМОИНДУКЦИЯ.**

**УРАВНЕНИЯ НА МАКСУЕЛ**

# I. ЕЛЕКТРОМАГНИТНА ИНДУКЦИЯ

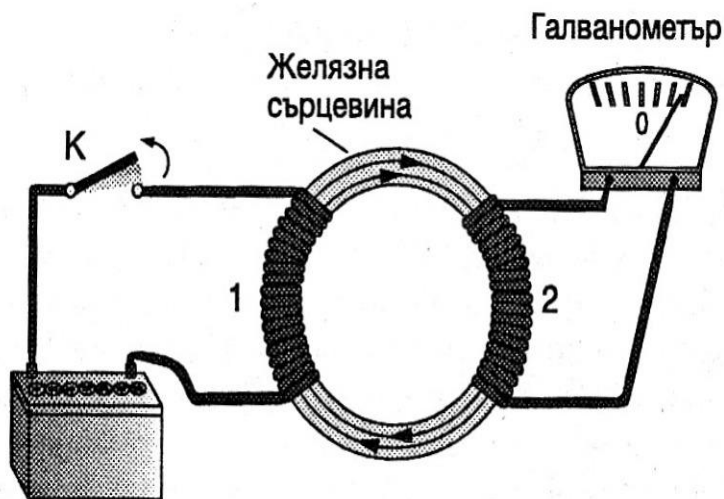
Оерщед и Ампер недвусмислено доказват че движещите се електрични заряди създават магнитни полета. Около всеки проводник по който тече ток възниква магнитно поле която действа с магнитна сила на магнитната стрелка и на внесен в полето токов елемент.

## 1. Опити и закон на Фарадей

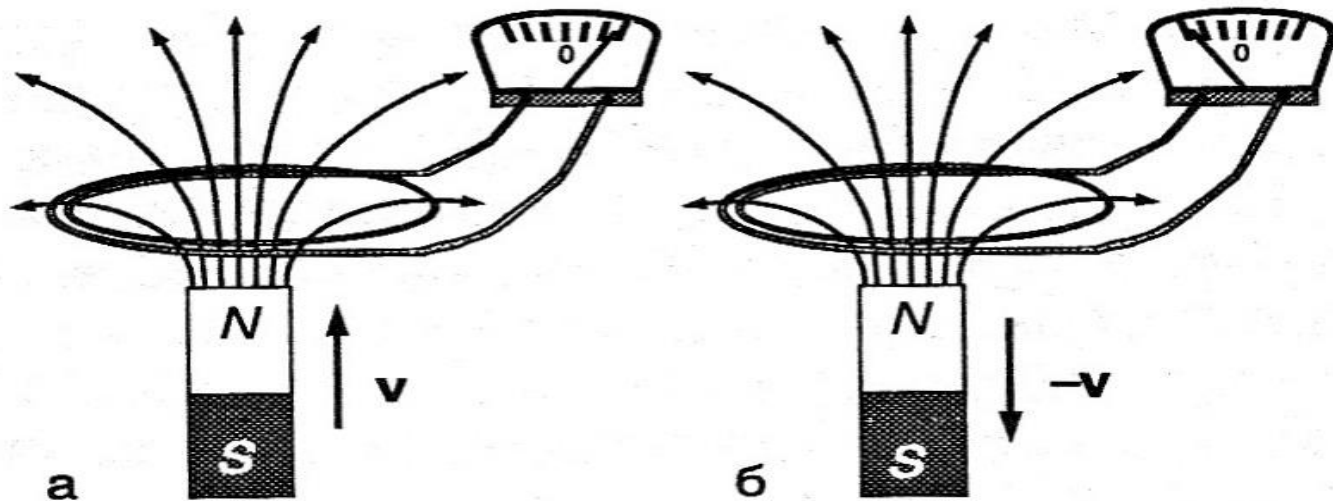
Майкъл Фарадей си задава въпроса възможно ли е магнитното поле да е причина за насочено движение на електрични заряди т.е за създаване на електричен ток.

1/ Първи опит на Фарадей: Около метален пръстен той навива намотки по показания начин. Едната е свързана с източник на ЕДН а другата с галванометър за отчитане на ток. Затваряйки веригата в първичната намотка той не отчита протичане на ток във вторичната. Забелязва, че в момента на затваряне на веригата на първичната намотка стрелката на галванометъра се отклонява за кратко време от нулата във вторичната намотка. Същото отклонение само че в противоположна посока се наблюдава при изключване на веригата. **ОСНОВЕН ИЗВОД: ПОСТО-**

**О МАГНИТНО ПОЛЕ НЕ ПРЕДИЗВИКВА ЧАНЕ НА ТОК. ТОК ПРОТИЧА ПРИ ПРО-**  
**НА МАГНИТНОТО ПОЛЕТО ТОЙ НАРАСТ-**  
**ОМЕНТА НА ВКЛЮЧВАНЕ НА ВЕРИГАТА**  
**МАЛЯВА ПРИ ПРЕКЪСВАНЕ НА ВЕРИ-**



2/Нови опити: Нека имане една намотка(кръгов токов контур) вкарваме и изкарваме бързо постоянен магнит. И в двата случая през намотката протича ток които отклонява стрелката на галванометъра в различни посоки т.е тока тече в различни посоки. Ако магнитът е неподвижен ток не тече.



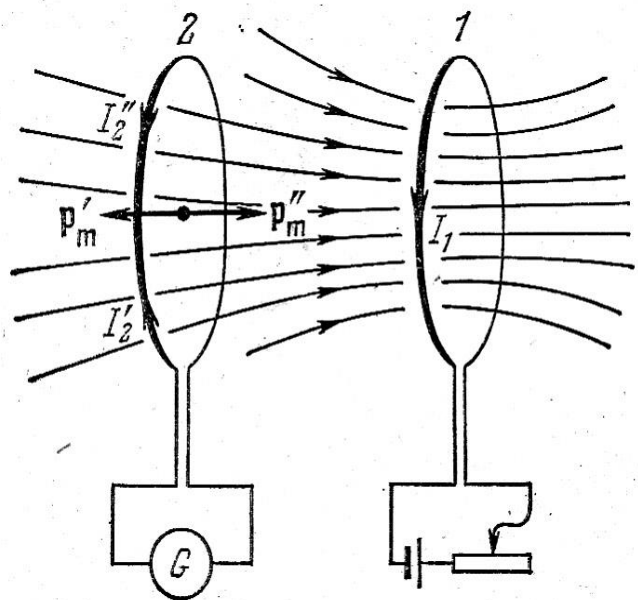
**ИЗВОД:**

1/ПРИ ПРИБЛИЖАВАНЕ НА МАГНИТА МАГНИТНОТО ПОЛЕ НАРАСТВА. ВСЕ ПОВЕЧЕ МАГНИТНИ СИЛОВИ ЛИНИИ ПРЕСИЧАТ ПЛОЩА ОГРАДЕНА ОТ ТОКОВИЯ КОНТУР КОЕТО ОЗНАЧАВА ЧЕ ЩЕ СЕ ПРОМЕНЯ ПОТОКА НА МАГНИТНОТО ПОЛЕ ПРЕЗ ТОЗИ КОНТУР И ТОКА ПРЕЗ НАМОТКАТА ЩЕ НАРАСТВА. ОБРАТНО ПРИ ОТДАЛЕЧАВАНЕ ЩЕ НАМАЛЯВА

2/ЗА ДА ПРОТИЧА ТОК ПРЕЗ КОНТУРА Е НЕОБХОВИМО ЗА СЕ СЪЗДАДЕ (ИНДУЦИРА) ЕДН. ЕДИНСТВЕНО ВЪЗМОЖНАТА ПРИЧИНА ЗА ИНДУЦИРАНЕ НА ЕДН СА ПРОМЕНЕТЕ В МАГНИТНОТО ПОЛЕ.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ:** Явлението, при което поради промяна на магнитното поле в един затворен проводников контур (намотка) протича електричен ток се нарича **ЕЛЕКТРОМАГНИТНА ИНДУКЦИЯ**, а самия ток – **ИНДУЦИРАН ТОК**. Електродвижещото напрежение което поражда индуцирания ток се нарича **ИНДУЦИРАНО ЕДН**.

**3/Трета група опити.** Имаме два токови контура. Единия е свързан със източник на ЕДН и реостат който променя тока през веригата. Във втория сме включили галванометър. Двете намотки не могат да извършват постъпателно една спрямо друга. Във вторичната намотка протича ток ако тя се завърти около оста си на някакъв ъгъл или като с реостата променяме големината на тока през първичната намотка:



**ИЗВОД:**

**1/МАГНИТНИЯ ПОТОК ЗАВИСИ ОТ ЪГЪЛА ПОД КОЙТО МАГНИТНИТЕ СИЛОВИ ЛИНИИ ПРОБОЖДАТ ПЛОЩА ОГРАДЕНА ОТ ВТОРИЧНАТА НАМОТКА. ПРОМЕНЯЙКИ ЪГЪЛА НИЕ ПРОМЕНЯМЕ ГОЛЕМИНАТА НА ПОТОКА ПРЕЗ ПЛОЩА НА ВТОРИЧНАТА НАМОТКА И ТОВА ВОДИ ДО ИНДУЦИВАНЕ НА ТОК.**

**2/ПРОМЕНЯЙКИ ТОКА ПРЕЗ ПЪРВИЧНАТА НАМОТКА СЕ МЕНИ СПОРЕД ЗАКОНА НА БИО-САВАР ГОЛЕМИНАТА НА МАГНИТНАТА ИНДУКЦИЯ т.е МЕНИ СЕ ПОЛЕТО И РЕСПЕКТИЧНО ПОТОКА ПРЕЗ ВТОРИЧНАТА НАМОТКА И СЕ ИНДУЦИРА ЕДН.**

- От всички анализирани опити можем да направим следните общи заключения
- 1/ПОСТОЯННО МАГНИТНО ПОЛЕ НЕ СЪЗДАВА ЕЛЕКТРИЧЕН ТОК.
  - 2/ПРОМЕНЕТЕ НА МАГНИТНИЯ ПОТОК ПРЕЗ ЗАТВОРЕНИЯ КОНТУР ИНДУЦИРАТ ЕДН
  - 3/ГОЛЕМИНАТА И ПОСОКАТА НА ИНДУЦИРАНИЯ ТОК ЗАВИСИ ОТ СКОРОСТТА НА ПРОМЯНА НА МАГНИТНИЯ ПОТОК.

Количествените измервания направени от Фарадей показват че индуцираното ЕДН зависи САМО И ЕДИНСТВАНО ОТ изменението на магнитния поток през рамката т.е от големината на първата производна на магнитния поток от времето.

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

**ЗАКОН НА ФАРАДЕЙ:** Големината на индуцираното ЕДН в намотката е равно на скоростта с която се изменя магнитния поток през повърхността, заградена от контура.

Ако ЕДН се индуцира в намотка с  $N$  на брой навивки през всяка от която преминава един и същ магнитен поток се изразява с уравнението:

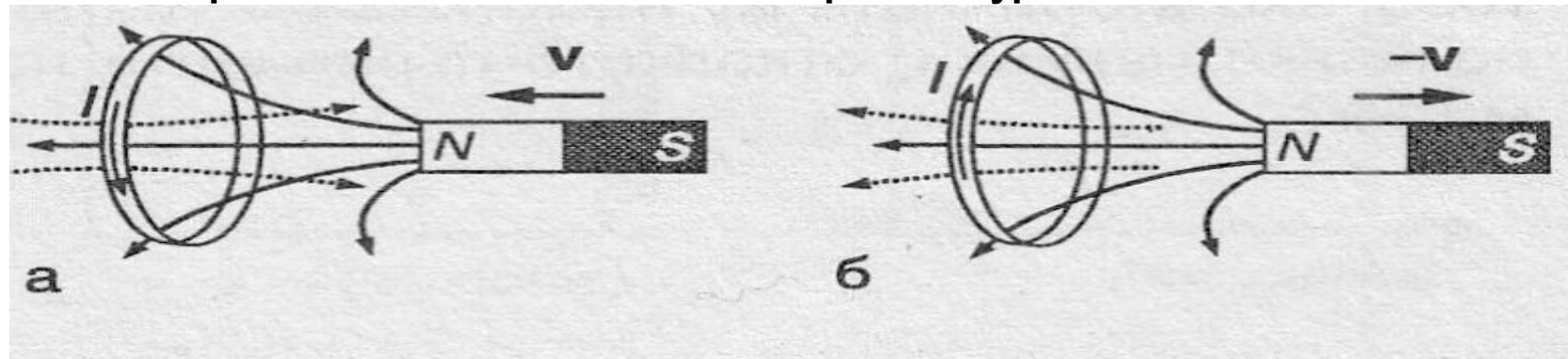
$$\varepsilon_i = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

## 2. Правило на Ленц.

Правило което определя посоката на индуцирания ток във всички случаи на електромагнитна индукция.

**ДЕФИНИЦИЯ:** Посоката на индуцирания ток в една намотка протича в такова направление че причиненото от него явление се противопоставя на причината която го създава. Това е максимално широка дефиниция.

**ПРАВИЛО НА ЛЕНЦ:** Посоката на индуцирания ток в затворен проводников контур е такава че създаденото от него магнитно поле се противопоставя на изменението магнитния поток създаващ този ток. Индуцирания ток винаги се стреми да запази първоначалния магнитен поток през контура.



а/ако магнита се движи към намотката тогава магнитния поток нараства в затворения токов контур. Все нови и нови магнитни силови линии ще пресичат площта заградена от контура. Тогава магнитните силови линии от полето създадено от индуцирания ток по правилото на Ленц ще имат посока обратна на магнитните силови линии на магнитния поток. Тогава по правилото на свитите пръсти на дясната ръка определяме посоката на индуцирания ток фиг а

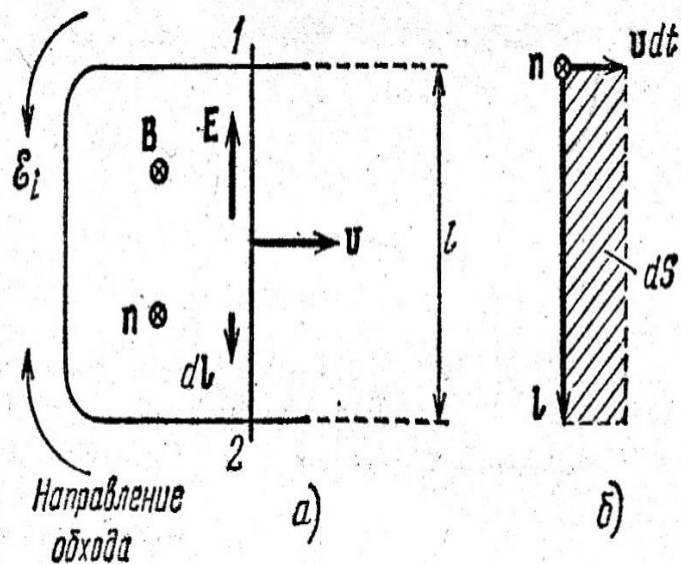
б/Ако магнита се отдалечава то намотката то магнитните линии на индуцирания ток ще имат посоката на магнитните линии на постоянния ток защото според Ленц индуцирания ток се стреми да запази първоначалния магнитен поток.

## II. ЕЛЕКТРОДВИЖЕЩА СИЛА НА ИНДУКЦИЯТА.

1. Изменения на магнитния поток дължащ на движение или изменение на геометрията на контура.

Нека една правоъгълна рамка едното рамо на която е подвижно се постави в хомогенно магнитно поле което е перпендикулярно на площта заградена от контура. Започваме да движима подвижното рамо на рамката което има дължина  $l$  под действието на външна сила с големина  $F_{\text{вън}}$ . Електроните от рамката се движат със скорост  $V$  заедно със средата (конвекционален ток) На подвижните заряди ще действа магнитна сила  $F_M$  посока на оста на подвижното рамо. Тогава имаме:

$$\vec{F}_{\downarrow} = -e(\vec{v} \times \vec{B})$$

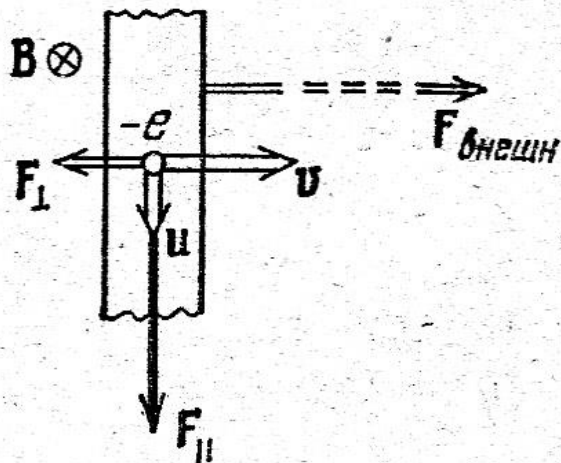


Под действието на тази сила електроните започват да се движат по проводника със скорост  $u$ . Тази сила действа като странична сила която има интензитет  $E$ :

$$\begin{aligned} \varepsilon_i &= \oint_L (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} = \int_1^2 (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} = \\ &= (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{l} = (\vec{l} \times \vec{v}) \cdot \vec{B} = (\vec{l} \times \frac{v dt}{dt}) \cdot \vec{B} = \\ &= \frac{(\vec{l} \times d\vec{r})}{dt} \cdot \vec{B} = -\vec{B} \cdot \frac{d\vec{S}}{dt} = -\frac{d}{dt} (\vec{B} \cdot \vec{S}) = -\frac{d}{dt} \Phi_B \end{aligned}$$

Тук обяснението на електромагнитната индукция в този случай се дължи на магнитната сила която се явява странична сила.

Не нарушават ли тези разглеждания направения по рано извод че магнитната сила не върши работа. В момента в които електроните започнат да се движат със



ост и по оста на рамката на електроните ще чне да действа допълнителна магнитна сила в посоката указана на чертежа. Тогава об- магнитна сила е:

$$\vec{F}_M = \vec{F}_{\downarrow} + \vec{F}_{\perp}$$

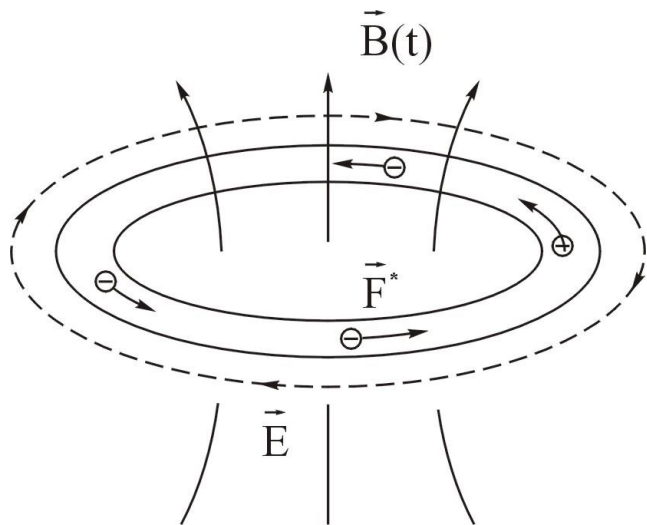
Работата на тази сила при нейното действие над електрона за време dt е:

$$dA = \vec{F}_{\downarrow} \cdot \vec{u} dt + \vec{F}_{\perp} \cdot \vec{v} dt = -evuBdt + euvB = 0$$

2. При неподвижен проводников контур. В предната точка поради движение на зарядите заедно с материалната среда отговорна за индуцирания ток бе магнитната сила. Как да се обясни случая на индуциране на ЕДН при промяна на магнитния поток през неподвижен токов контур. Зарядите в контура са неподвижни и магнитна сила не им действа. Това че имаме протичане на ток обаче недвусмислено показва че се индуцира ЕДН и зарядите се движат под действия на електрична сила. Единствената възможност в този случай е както изтъква Фарадей е променливото магнитно поле да създаде променливо електрично поле. Нека е  $E$  означим интензитета на това поле. Работата която то извършва за пренасяне на единица заряд определя индуцираното електродви-



жещо напрежение. Тогава можем да запишем следното:



$$\varepsilon_i = \oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

В този случай промяната на магнитния поток е свързан с промяна на стойността на магнитната индукция докато  $S = \text{const}$ . Тогава закона на Фарадей в интегрална форма има вида.

$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\int_S \frac{d\vec{B}}{dt} \cdot d\vec{S}$$

Използвайки теоремата на Стокс можем да преобразуваме както следва:

$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_S \text{rot} \vec{E} \cdot d\vec{S} = -\int_S \frac{d\vec{B}}{dt} \cdot d\vec{S}$$

$$\int_S \left( \text{rot} \vec{E} + \frac{d\vec{B}}{dt} \right) \cdot d\vec{S} = 0$$

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt}$$

## ИЗВОДИ:

1/променливото електрично поле вихрово. Циркулацията на вектора на интензитета на това поле не е нула. Това означава че неговите силови линии са затворени криви

2/вихровото електрично поле не се създава от заряди а от променливо магнитно поле

3/вихровото електрично поле не допуска скаларен потенциал.

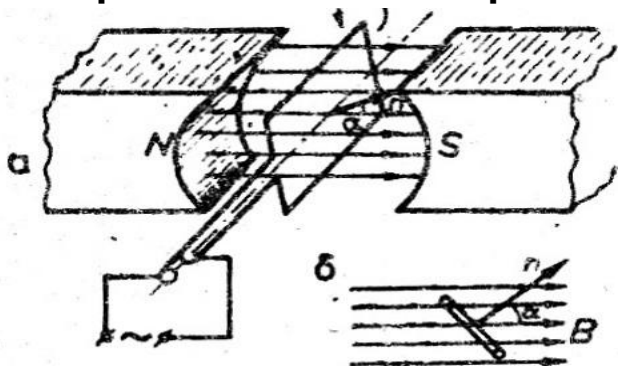
4/Електромагнитната индукция е пример за неразривната връзка между електричните и магнитните явление.

Тик обаче е налице явна асиметрия: променливо магнитно поле създава вихрово електрично поле обратното не е наблюдавано. Този факт пръв отчита Максвел и допуска теоретично че променливо електрично поле може да създаде променливо магнитно поле като доказва че връзката между двете полета се в диференциална форма има вида:

$$\mathit{rot}\vec{B} = \mu_0\epsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt}$$

Доказателство за правотата на Максвел е електромагнитната вълна. Това е особен тип вълна което може да се разпространява и във вакуум. Тук нямаме трептене на частици от една материална среда а трептене на магнитни и електрични полета т.е трептене на величините които характеризират тези полета( електричния и магнитния вектори). Нейното разпространение става като имаме самосъгласувано превръщане на електрично в магнитно поле и обратно.

3. Въртене на правоъгълна рамка в хомогенно магнитно поле: При въртенето на рамката се променя ъгъла между магнитните силови линии и нормалата към повърхността на правоъгълната проводяща рамка.



Нека рамката завъртим олоко ос на симетрия със постоянна ъглова скорост  $\omega$ . Тогава за време  $t$  рамката ще се завърти около оста си на ъгъл  $\alpha = \omega t$ . В този случай за магнитния поток имаме:

$$\Phi_B = BS \cos \alpha = BS \cos \omega t$$

При това въртене на рамката ще се променя магнитния поток през рамката периодично с период  $T = (2\pi/\omega)$  и ще се индуцира електродвижещо напрежение. Според закона на Фарадей имаме:

$$\varepsilon_i = -\frac{d}{dt}(BS \cos \omega t) = BS \omega \sin \omega t$$

$$\varepsilon_i(t) = \varepsilon_0 \sin \omega t$$

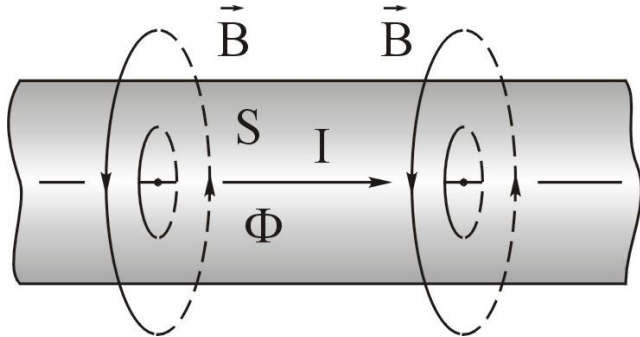
Ако към този механичен източник на ЕДН присъединим товар (активно омово съпротивление  $R$ ) от закона на Ом за цялата верига имаме:

$$I = \frac{\varepsilon_i(t)}{R + r} = \frac{\varepsilon_0 \sin \omega t}{R + r} = I_0 \sin \omega t$$

Този ток зависещ от времето по периодичен закон наричаме променлив ток.

# III. САМОИНДУКЦИЯ

1. Индуктивност: Нека по проводник тече ток с големина  $I$ . Той създава магнитно поле с магнитна индукция  $\vec{B}$ . Това поле прониква и във веществото на проводника. През сечението на проводника се създава собствен магнитен поток  $\Phi$ . Тъй като магнитната индукция  $B$  е пропорционална тока  $I$  а потока  $\Phi$  на  $B$  то има линейна връзка между  $\Phi$  и  $I$  т.е:



$$\Phi = LI$$

Величина  $L$  е константа за дадения проводник и се нарича индуктивност. Измерва се в единици “ХЕНРИ”

а/характеристика на индуктивността:

1/зависи от формата и размерите на проводника, вида на средата и вида на веществото

2/Независи от тока и магнитния поток

3/едно вещество има индуктивност дори и по него да не тече ток.

2. Самоиндукция: Нека имаме намотка по която тече ток които създава магнитен поток през сечението на проводника. Ако тока промени големината си то ще се измени магнитния поток през рамката и е нея ще се индуцира ЕДН  $\varepsilon_S$  и ток  $I_s$ . Това явление наричаме самоиндукция.

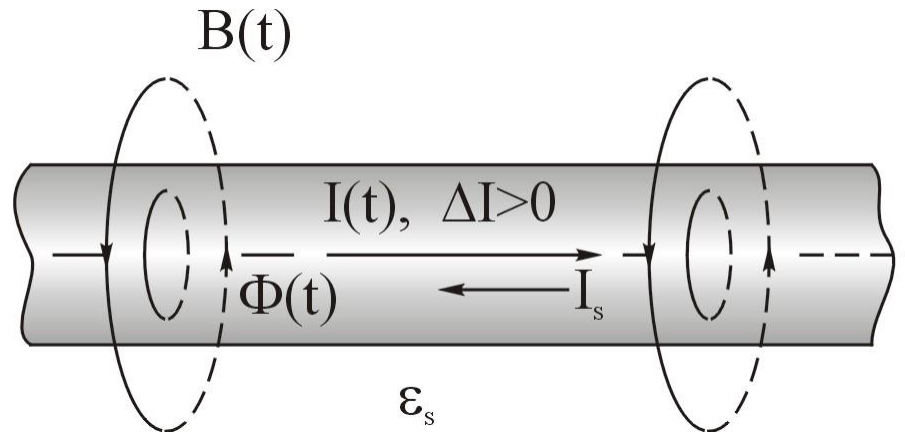
а/големина на соамоиндуцирания ток: По закона на Фарадей имаме:

$$\varepsilon_s = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(LI)}{dt} = -L\frac{dI}{dt}$$

За големината на тока имаме:

$$I_s = \frac{\varepsilon_s}{R} = -\frac{L}{R}\frac{dI}{dt}$$

б/посока на самоиндуцирания ток: Определя се от правилото на Ленц т.е самоиндуцирания ток  $I_s$  се противопоставя на изменението на основния ток през проводника. Ако  $I$  нараства то  $I_s$  е в обратна посока на  $I$ , ако тока  $I$  намалява то  $I_s$  е в същата посока на  $I$ .



# IV. УРАВНЕНИЯ НА МАКСВЕЛ

## 1. Уравнения на електромагнитната теория:

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon_r}$$

Закон на Кулон

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

не съществуват магнитни заряди (монополи)

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Закон на Фарадей за електромагнитната индукция

$$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{j} + \mu_0 \mu_r \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

циркуляция на магнитното поле

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

закон на Ом

<https://sites.google.com/site/a4o4you/>