

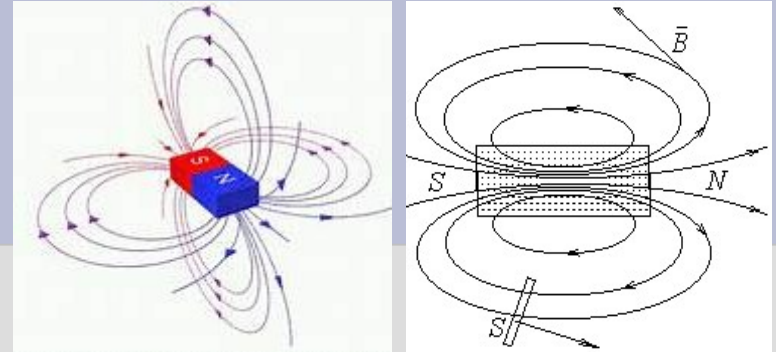


# МАГНІТНІ КОЛА

*National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"*

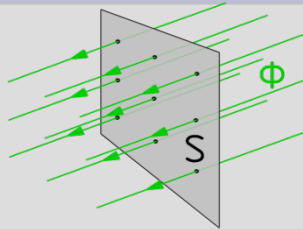
# ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ І ЗАКОНИ МАГНІТНИХ КІЛ

1. Як проявляє себе магнітне поле
2. Параметри, що характеризують магнітне поле



Магнітний потік  $\Phi$

$$\Phi = BS \cos \alpha$$



Індукція магнітного поля  $\vec{B}$   $B = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S}$   $B = \frac{\Phi}{S}$

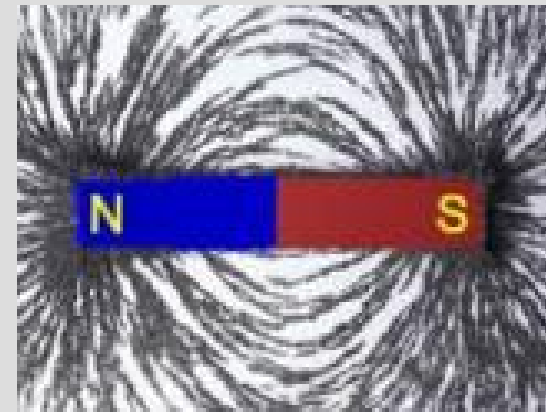
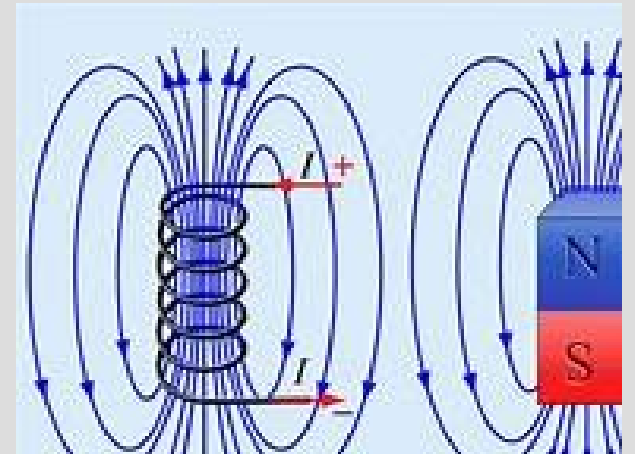
Напруженість магнітного поля  $\vec{H}$   $\vec{B} = \mu_a \vec{H}$

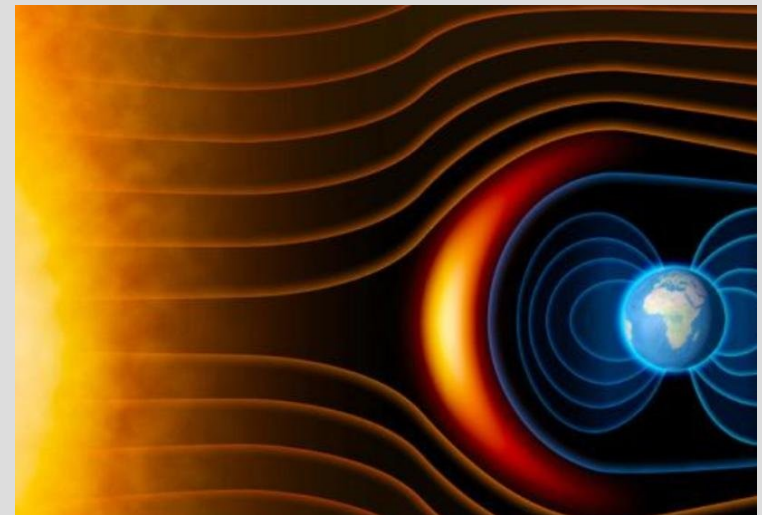
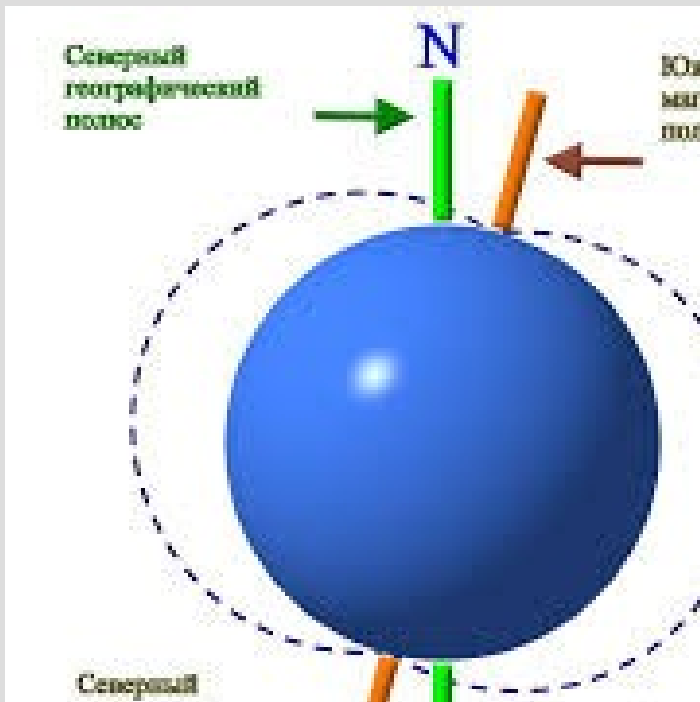
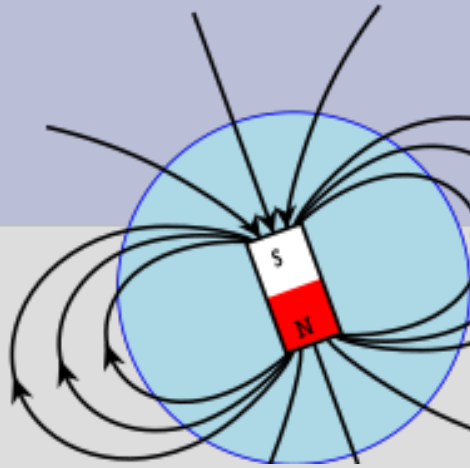
Відносна магнітна проникливість  $\mu_r = \mu_a / \mu_0$ ,

В вакуумі  $B = \mu_0 H$   $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м

Потік вектору індукції магнітного поля через замкнену поверхню

$$\Phi = \oint_s \vec{B} d\vec{s} = 0$$

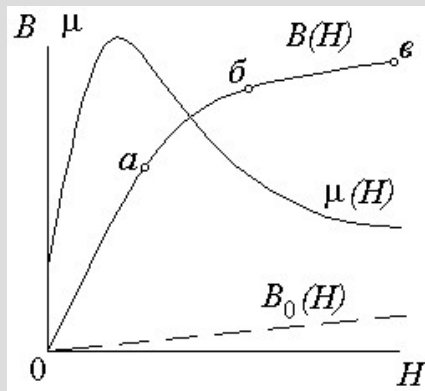




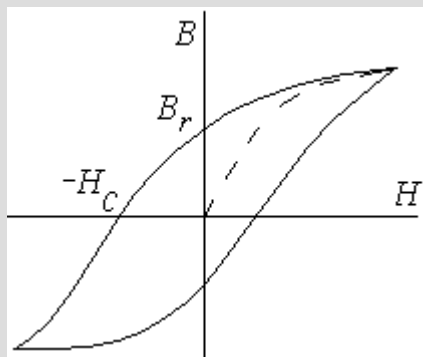
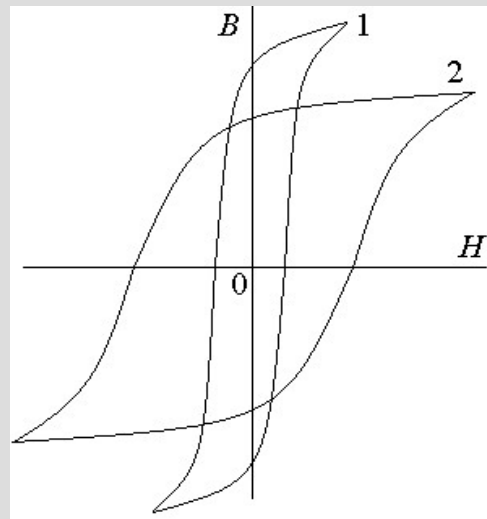
## Магнітні властивості матеріалів

*Немагнітні матеріали* (пара- і діамагнетики):  
відносна магнітна проникливість  $\mu_r \approx 1$ .

*Магнітні матеріали* (ферромагнетики): відносна магнітна  
проникливість  $\mu_r \gg 1$ .

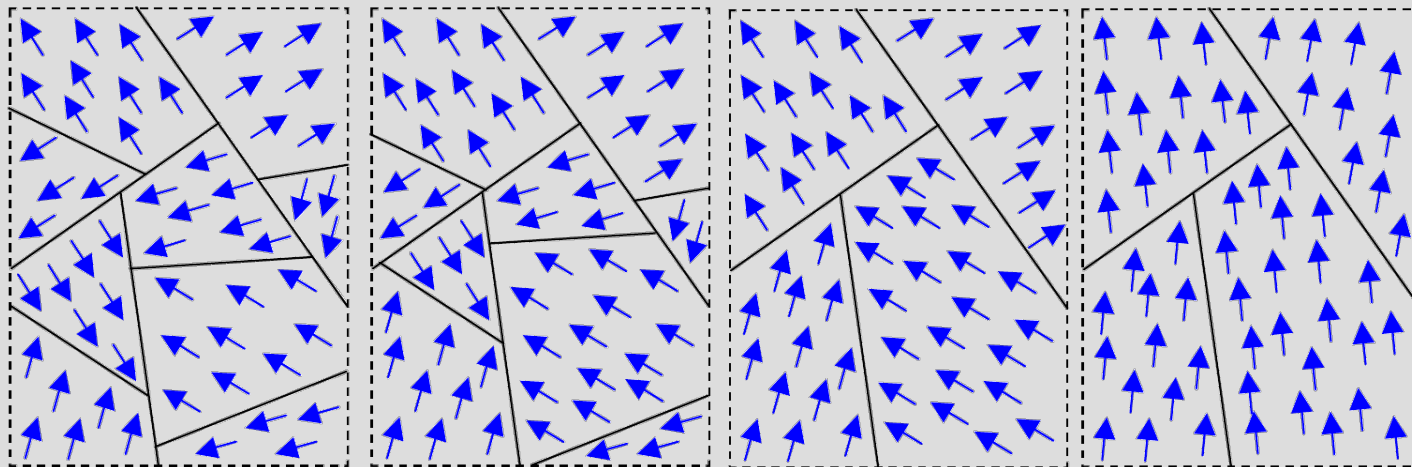
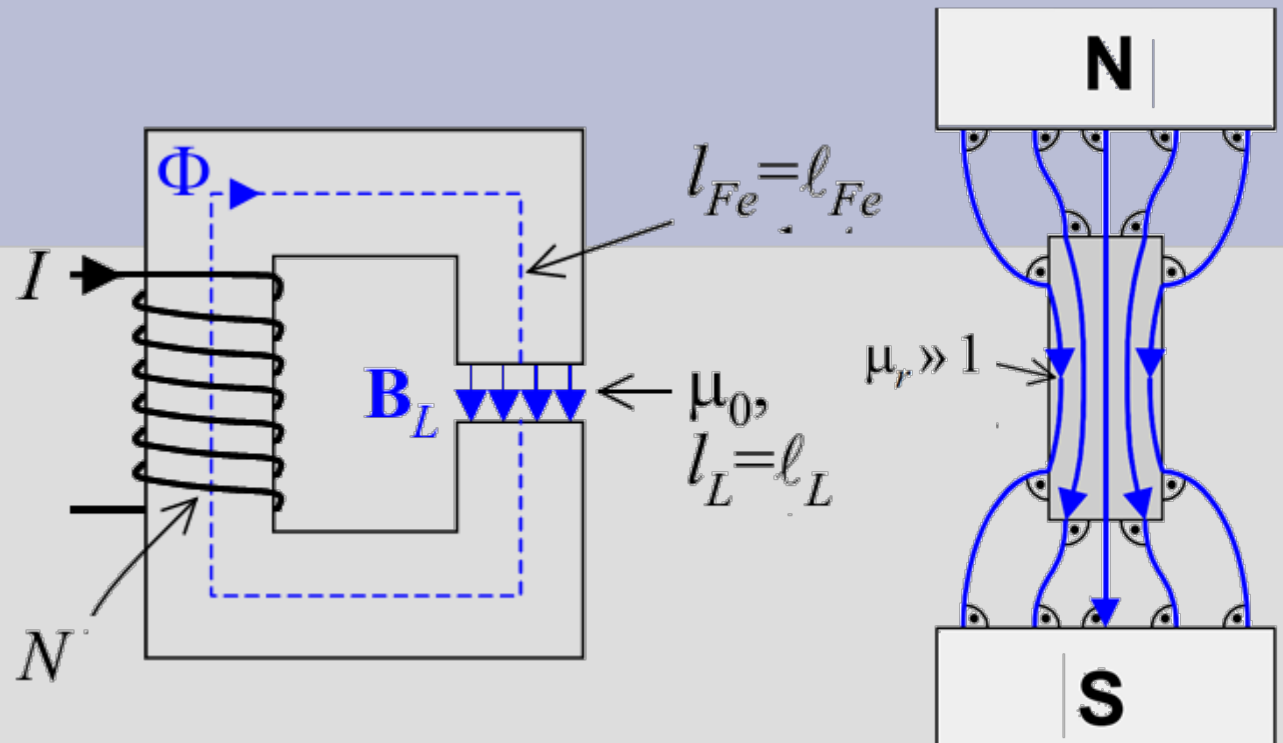
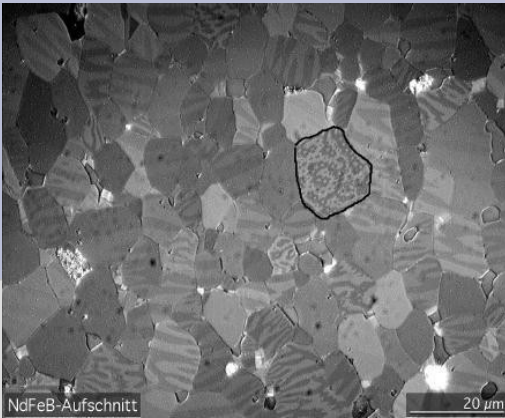


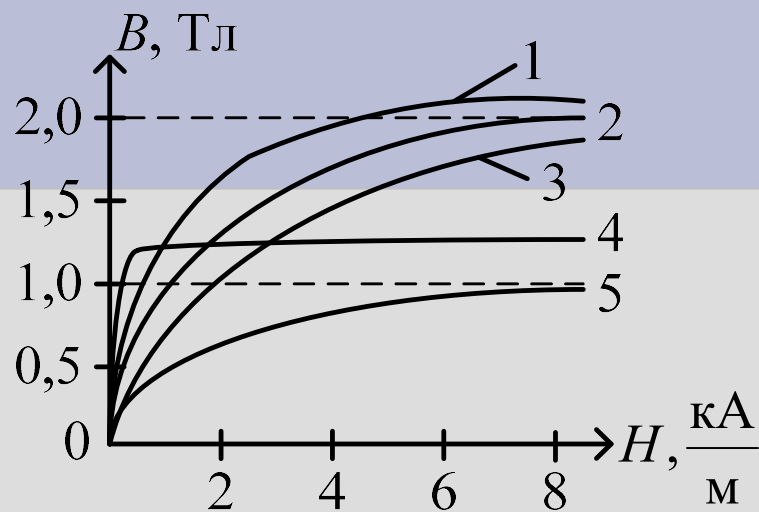
Крива намагнічування  $B(H)$  та  
залежність  $\mu(H)$  для ферромагнетиків



Петля гістерезису

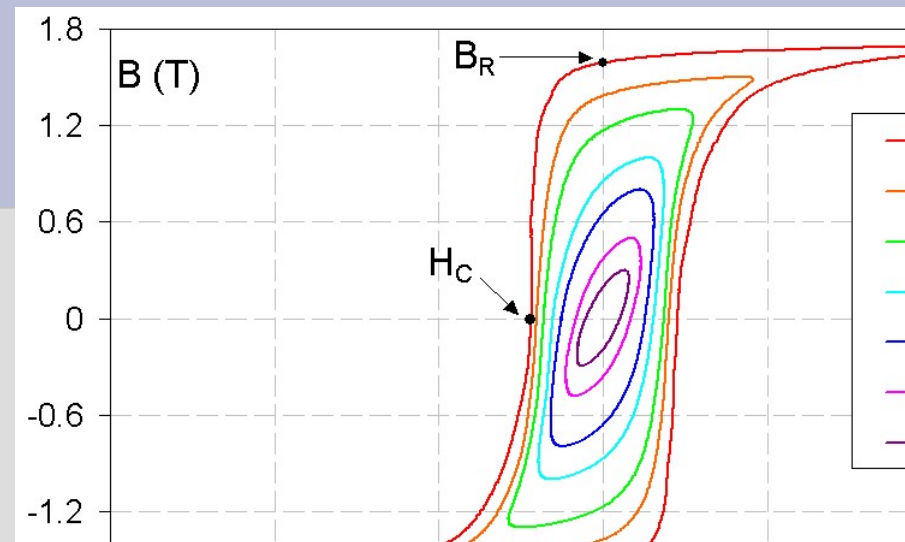






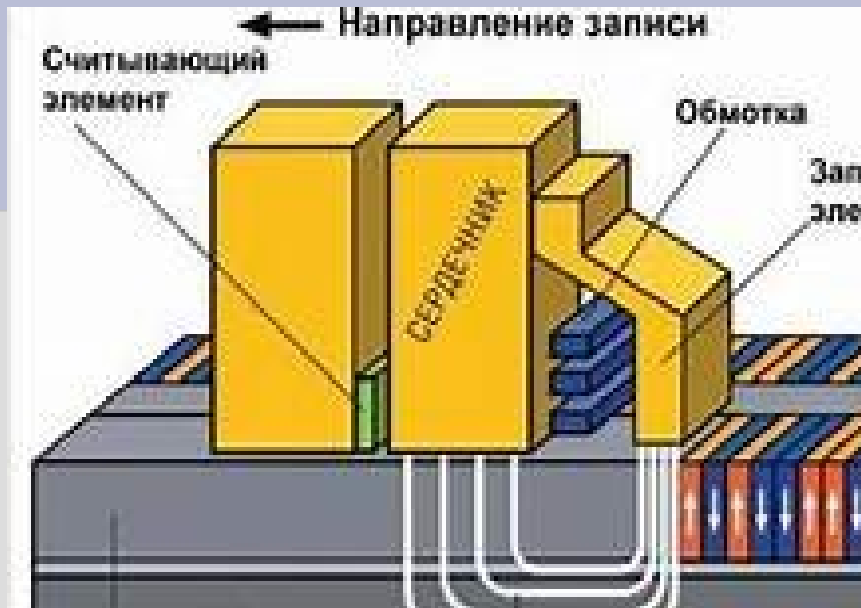
Ряд кривих намагнічування показано на рисунку:

- 1 – холоднокатана листовая електротехнічна сталь;
- 2 – гарячекатана листовая електротехнічна сталь;
- 3 – стальне литво;
- 4 – пермалой;
- 5 – чавунне литво.

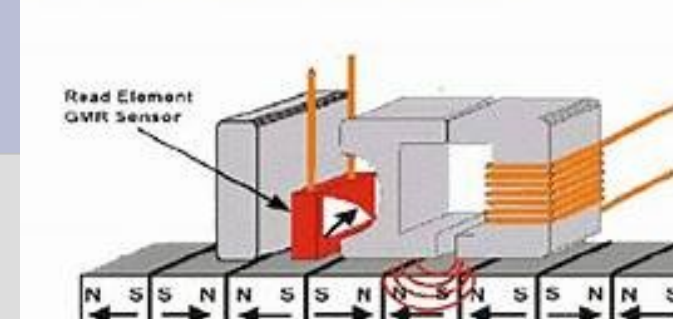


Сімейство петель магнітної гістерези електротехнічної сталі.  $B_R$  – залишкова індукція,  $H_C$  – коерцитивна сила, зовнішня петля відповідає стану насичення

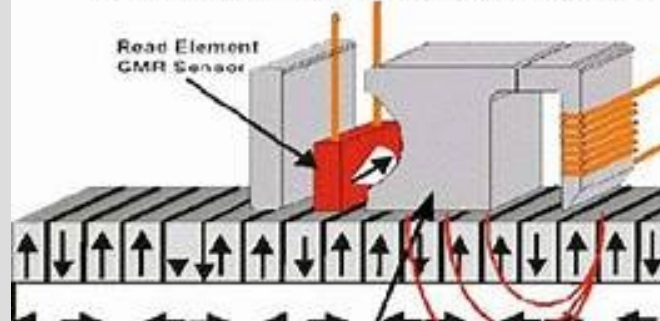
# Магнітні накопичувачі інформації



Продольная технология записи



Технология перпендикулярной записи



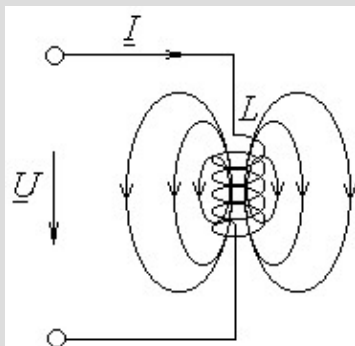
## Закон електромагнітної індукції

**Електромагнітною індукцією** називають явище збудження ЕРС у контурі при змінненні магнітного потоку, зчепленого з ним. Індукована ЕРС дорівнює швидкості потоку, зчепленого з контуром

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}$$

### Правило Ленца

Струм, створюваний у замкненому контурі індукованої ЕРС, завжди має такий напрям, що магнітний потік струму протидіє змінненню магнітного потоку зовнішнього поля, яке його спричинило



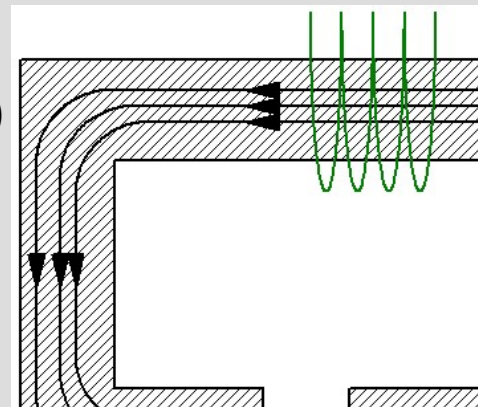
Магнітне поле багатовиткової обмотки

ЕРС, індукована в обмотці, дорівнює сумі ЕРС кожного витка

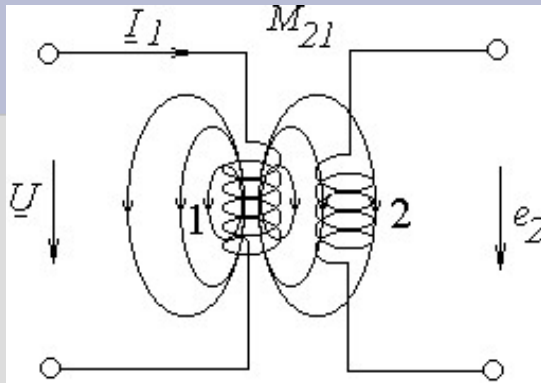
$$e = \sum_{k=1}^w e_k \quad e = \sum_{k=1}^w e_k = -\frac{d}{dt}(\Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_w)$$

Потокозчеплення обмотки  $\Psi = (\Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_w)$

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} \quad \Psi = w\Phi \quad e = -w\frac{d\Phi}{dt}$$



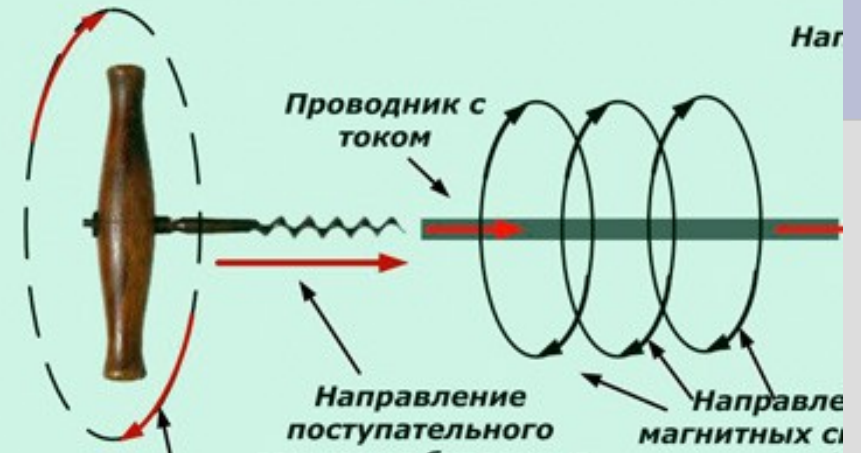
## ЕРС само- і взаємоіндукції



$$e_2 = -M_{21} \frac{di_1}{dt}$$

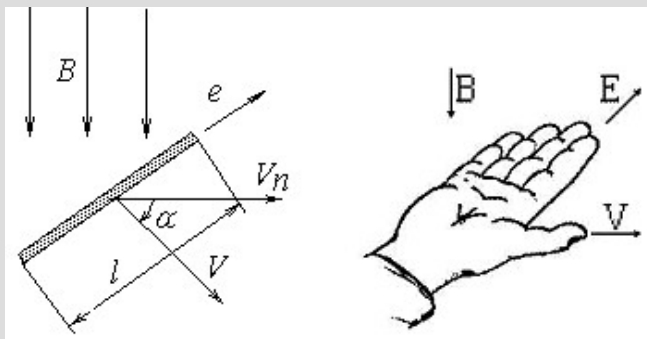
$$M_{21} = \frac{\Psi_2}{i_1}$$

## Правило буравчика для прямолинейного проводника



## Закон електромагнітної індукції

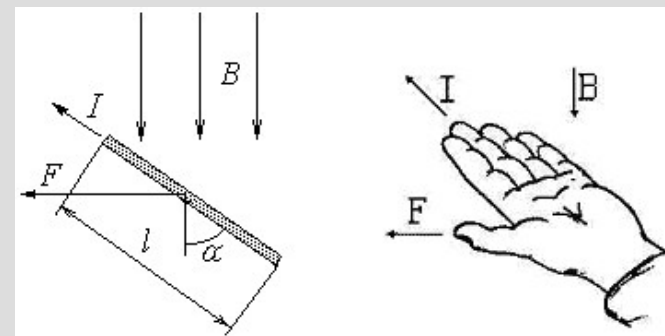
$$E = B \cdot l \cdot V \sin \alpha$$



правило правої руки

## Закон Ампера

$$F = B \cdot l \cdot I \sin \alpha$$



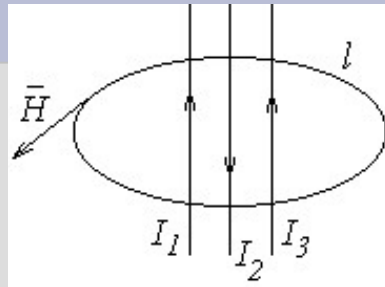
правило лівої руки

## Закон повного струму

Лінійний інтеграл від вектору напруженості магнітного поля вздовж будь-якого замкненого контуру, який пронизують провідники зі струмом, дорівнює повному струму, що охоплює даний контур

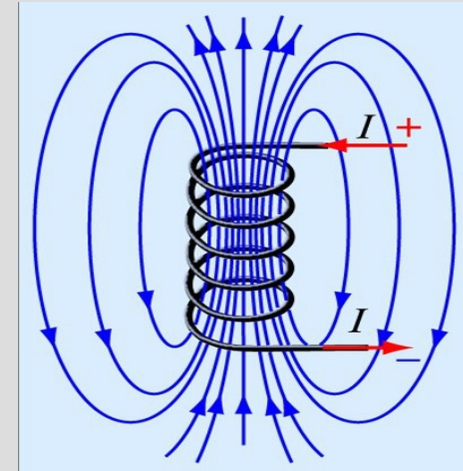
$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \sum I_k$$

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = I_1 - I_2 + I_3$$



Для багатовиткової обмотки з числом витків  $w$ :

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = wI$$

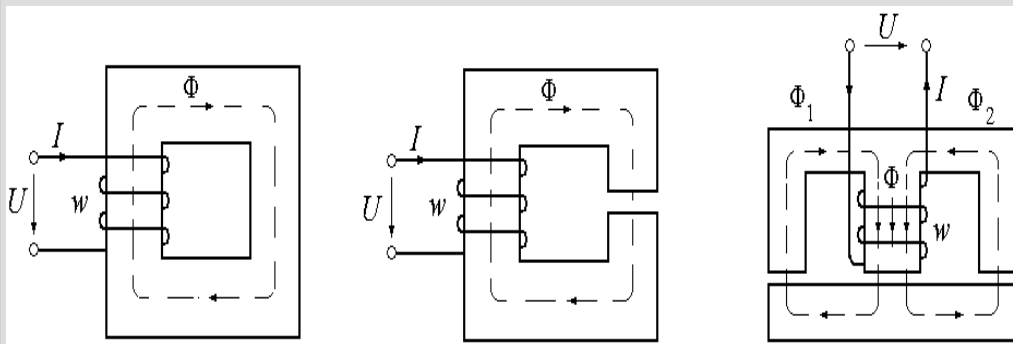


Магніторушійна сила (МРС):  $F = wI$

При практичних розрахунках:  $\oint \vec{H} d\vec{l} = \sum_{k=1}^n H_k l_k$

$$\sum_{k=1}^n H_k l_k = \sum_{k=1}^m I_k w_k$$

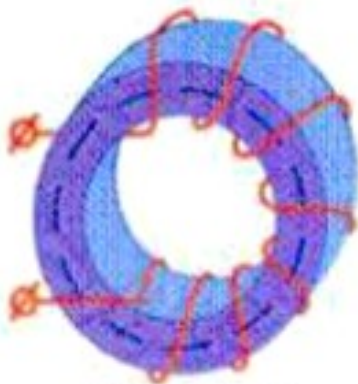
Класифікація магнітних кіл



Правило буравчика для кільцевого пр



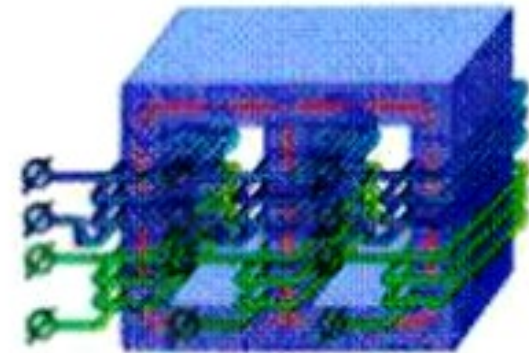
Однородная магнитная цепь



Катушка с тороидальным сердечником



Однофазный трансформатор

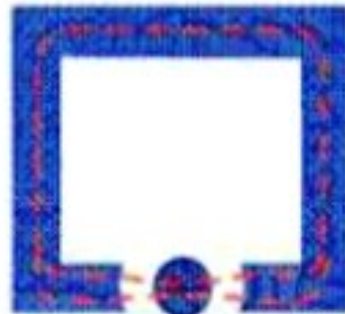


Трехфазный трансформатор

Неоднородная магнитная цепь



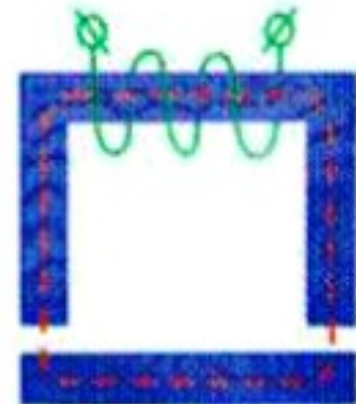
Машина постоянного тока



Магнитоэлектрический измерительный механизм

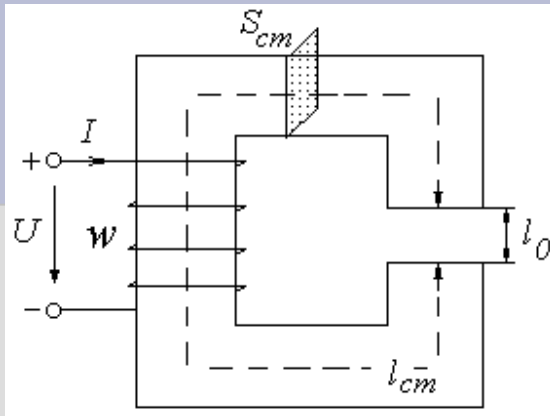


Электромагнитное реле



Подъемный электромагнит

## Котушка зі сталевим осердям



$$H_{\tilde{n}0} \cdot l_{\tilde{n}0} + H_0 \cdot l_0 = I \cdot w$$

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

$$B = \frac{\Phi}{S}$$

$$H = \frac{\Phi}{\mu_a S}$$

$$\frac{\Phi \cdot l_{\tilde{n}0}}{\mu_{\tilde{n}0} S_{\tilde{n}0}} + \frac{\Phi \cdot l_0}{\mu_0 S_0} = I \cdot w$$

$$\Phi = \frac{I \cdot w}{\frac{l_{\tilde{n}0}}{\mu_{\tilde{n}0} S_{\tilde{n}0}} + \frac{l_0}{\mu_0 S_0}} = \frac{I \cdot w}{\sum R_M}$$

Закон Ома для магнітного кола

$$R_{M_0} = \frac{l_0}{\mu_0 S_0} \quad R_{M_{\tilde{n}0}} = \frac{l_{\tilde{n}0}}{\mu_{\tilde{n}0} S_{\tilde{n}0}}$$

## Аналогія між електричними і магнітними колами

Електричні величини	Позначення і вираз		Магнітні величини	Позначення і вираз
Струм	$I$	-	Потік	$\Phi$
ЕРС	$E$	-	МРС	$F = wI$
Опір	$R = \rho \frac{l}{S}$	-	Опір	$R_M = \frac{l}{\mu_a S}$
Напруга	$U = I \cdot R$	-	Напруга	$U_M = H_k l_k = \Phi \cdot R_{M_k}$
Питома провідність	$\gamma = \frac{1}{\rho}$	-	Магнітна проникливість	$\mu_a$

## 1-й закон Кірхгофа для магнітного кола:

Сума магнітних потоків віток розгалуженого магнітного кола у вузлі дорівнює нулю

$$\sum_k \Phi_k = 0$$

## 2-й закон Кірхгофа для магнітного кола:

МРС нерозгалуженого неоднорідного магнітного кола дорівнює арифметичній сумі падінь магнітних напруг на окремих її ділянках

$$\sum_k U_{M_k} = \sum_k F_k$$

## Принцип розрахунку магнітних кіл постійного струму

Задано: потік магнітний потік  $\Phi$ , розміри магнітопроводу, матеріал осердя, марка сталі, крива намагнічування  $B(H)$ .

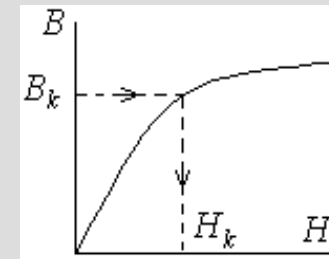
Задача: Знайти  $F = wI$  – МРС обмотки, необхідну для створення цього магнітного потоку  $\Phi$ .

1. Коло розбивається на ділянки
2. Визначаємо індукцію на кожній ділянці:
3. Визначаємо напруженість  $H_k$

4. Знаходимо МРС

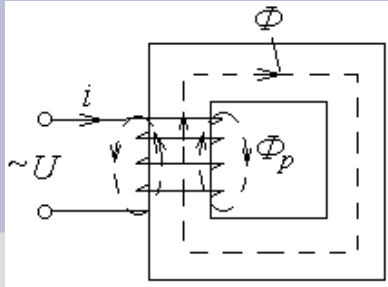
$$F = I \cdot w = \sum_{k=1}^n H_k l_k$$

$$I = \frac{F}{w}$$



$$H_k = \frac{B_k}{\mu_0}$$

# МАГНІТНІ КОЛА ЗІ ЗМІННОЮ МАГНІТОРУШІЙНОЮ СИЛОЮ



$$\Phi \Rightarrow e = -w \frac{d\Phi}{dt}$$

$$\Phi_\delta \Rightarrow e_\delta = -w \frac{d\Phi_\delta}{dt}$$

За другим законом Кірхгофа:

$$u = -e - e_p + i \cdot R$$

Форми залежностей ЕРС і струму від часу для ідеалізованої котушки зі сталевим осердям

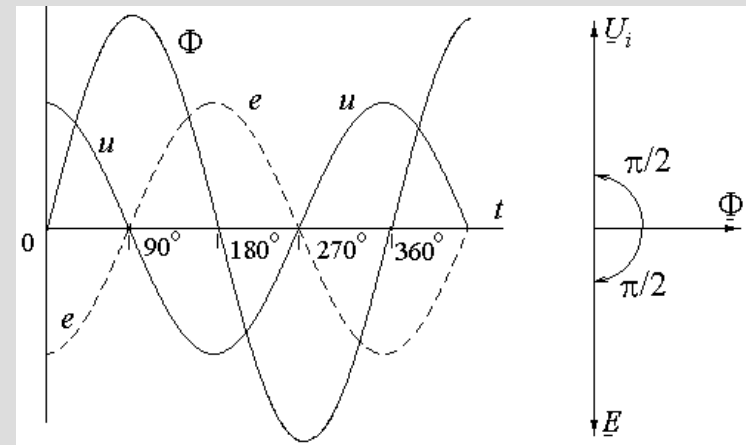
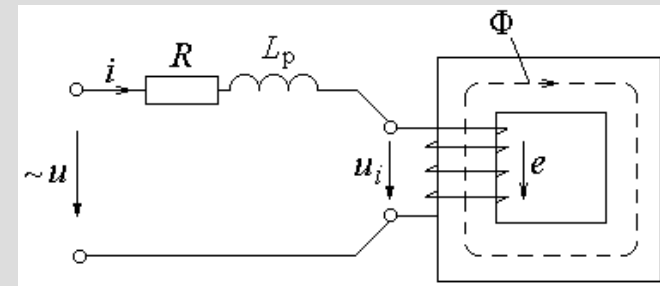
$$u_s = U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

$$u_s = -e = w \frac{d\Phi}{dt} \quad e = E_m \left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

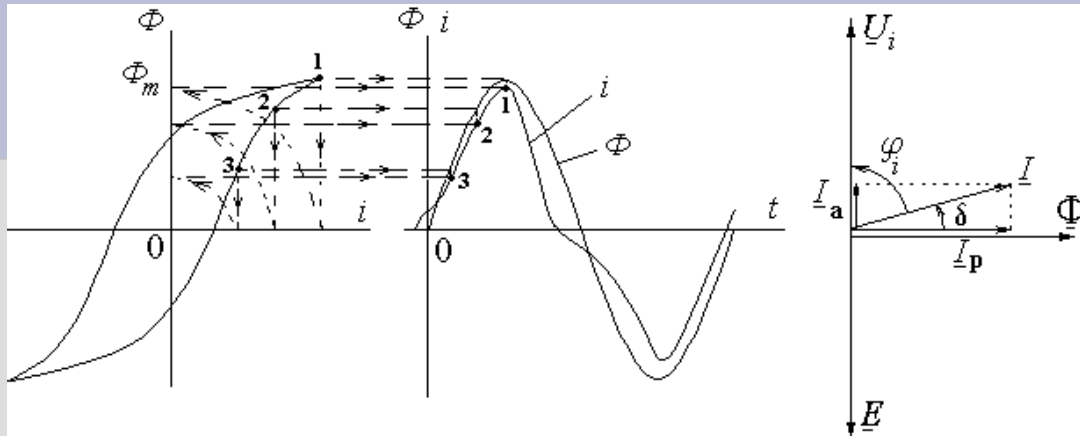
$$e = -w \frac{d\Phi}{dt} = E_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = -E_m \cos \omega t$$

$$\Phi = -\frac{1}{w} \int e dt = -\frac{1}{w} \int E_m \cos \omega t dt = \frac{E_m}{w \cdot \omega} \sin \omega t = \Phi_m \sin \omega t$$

$$\Phi_m = \frac{E_m}{\omega \cdot w} \quad \omega = 2\pi \cdot f \quad E = \frac{2\pi \cdot f \cdot w}{\sqrt{2}} \Phi_m = \sqrt{2} \pi f w \Phi_m = 4,44 w \cdot f \cdot \Phi_m$$



## Побудова графіка змінного струму (а) та векторна діаграма (б) ідеалізованої котушки зі сталевим осердям



$$\underline{I} = \underline{I}_a + \underline{I}_p$$

$$I_p = I \cos \delta$$

$$I_a = I \sin \delta$$

$\delta$  - кут магнітного запізнювання або кут втрат  
 $\delta$  в сталі (складає декілька градусів)

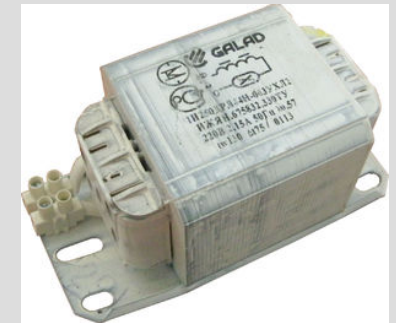
$\varphi_i$  - кут зсуву фаз між напругою  $U_i$  та струмом  $I$ .

Активна потужність

$$P_i = U_i I \cos \varphi_i = U_i I \sin \delta = U_i I_a$$

Реактивна потужність

$$Q_{\dot{e}} = U_{\dot{e}} I \sin \varphi_{\dot{e}} = U_{\dot{e}} I \cos \delta = U_{\dot{e}} I_p$$



## Векторна діаграма і втрати реальної котушки

$$\underline{U} = -\underline{E} - \underline{E}_p + \underline{I} \cdot R \quad \underline{E}_p = -\underline{U}_p = -jX_p \underline{I} \quad u = -e - e_p + i \cdot R$$

$$\underline{U} = -\underline{E} + jX_p \underline{I} + \underline{I} \cdot R$$

Активна потужність, яку споживається котушкою

$$P = UI \cos \varphi \quad U \cos \varphi = IR + E \cos \varphi_i = IR + E \cos(90^\circ - \delta)$$

$$P = UI \cos \varphi = I^2 R + IE \cos \varphi_e = \Delta P_i + \Delta P_{\dot{n}\dot{o}}$$

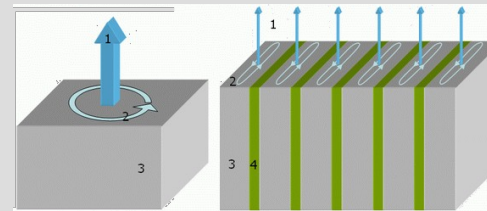
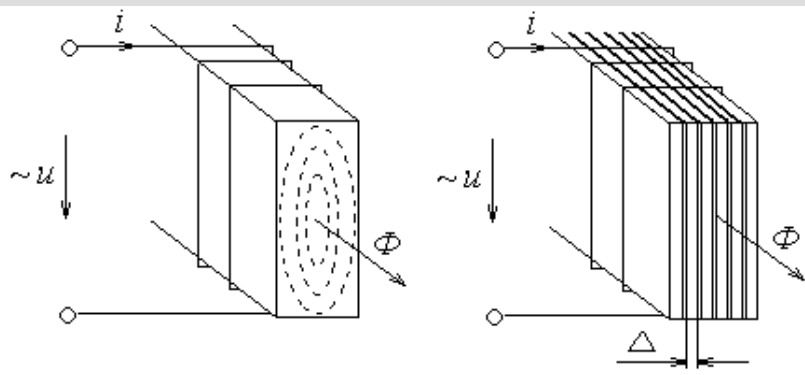
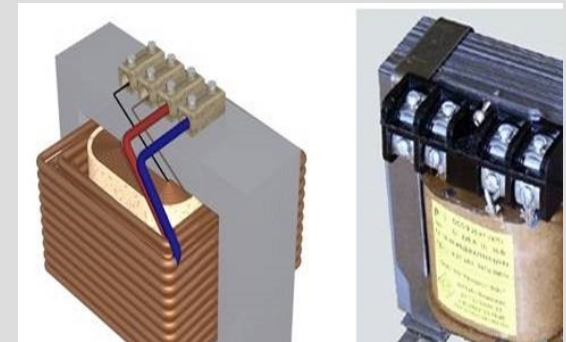
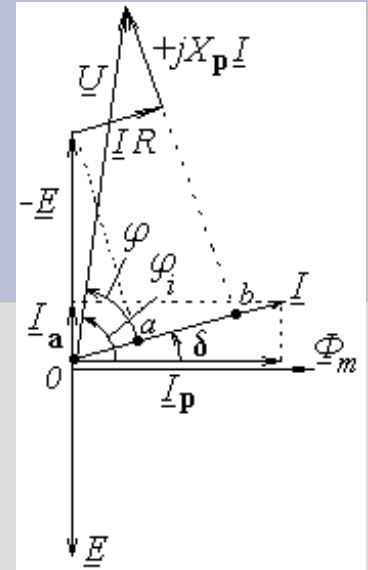
$\Delta P_i = I^2 R$  потужність, що витрачається в активному опорі обмотки.  
Її називають втратами у міді

$\Delta P_{\dot{n}\dot{o}} = IE \cos \varphi_i = EI \sin \delta$  втрати у сталі осердя

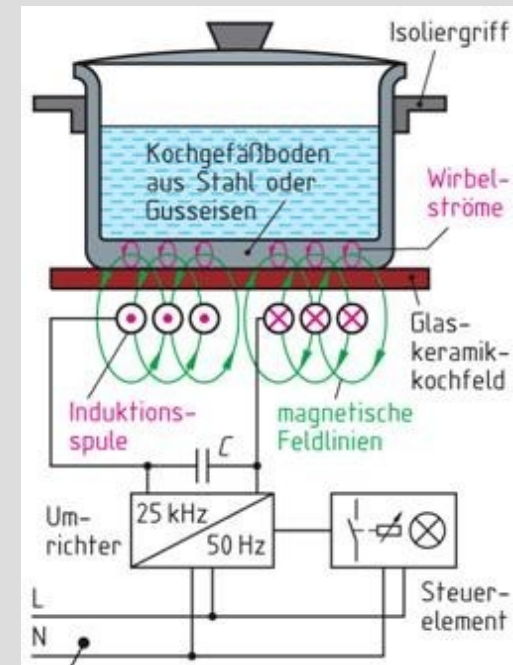
$$\Delta P_{\dot{n}\dot{o}} = P_{\dot{a}} + P_{\dot{\omega}}$$

$P_{\dot{a}}$  – втрати на гістрезис;  $P_{\dot{a}} = \sigma_{\dot{a}} f \cdot B_m^n G$

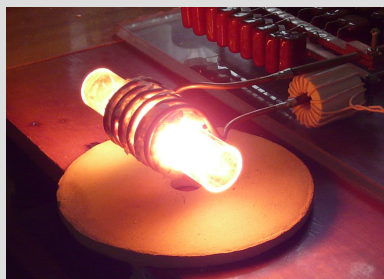
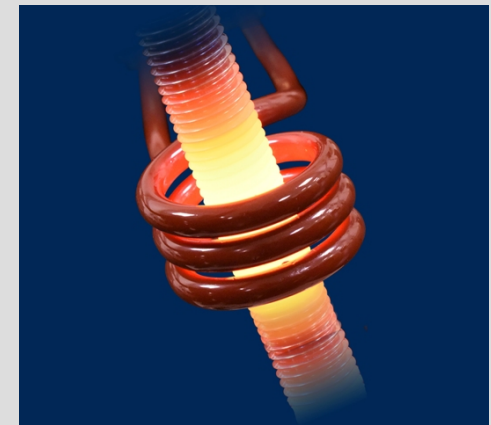
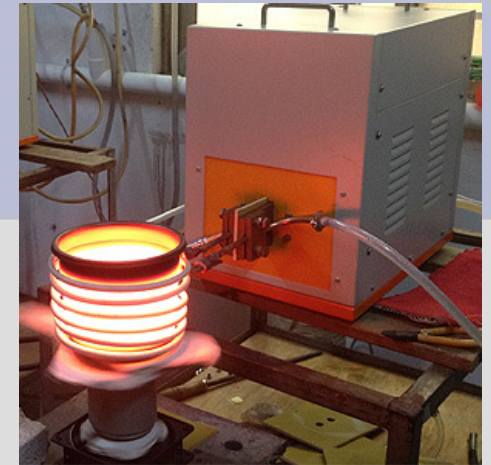
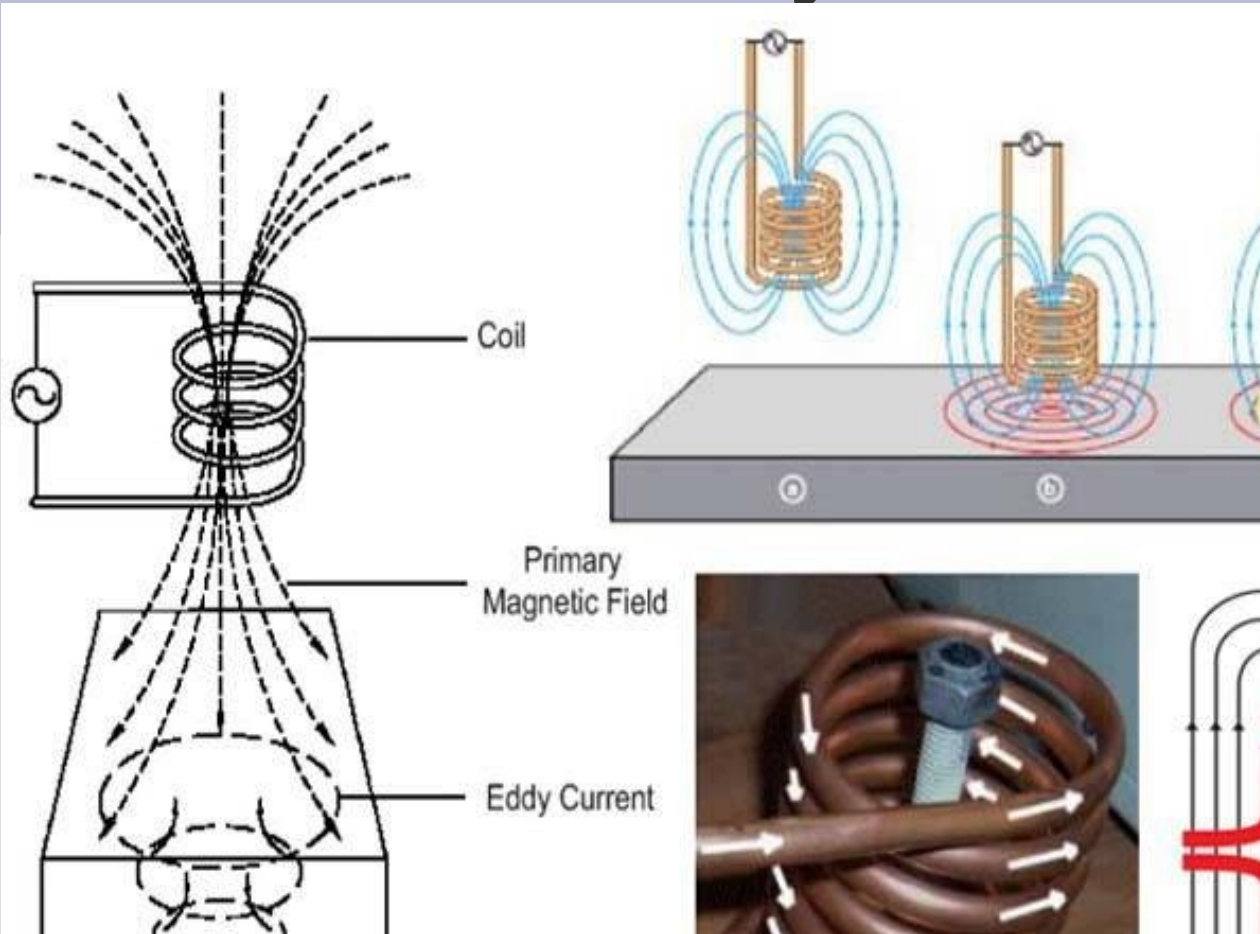
$P_{\dot{\omega}}$  – втрати на вихрві струми.  $P_{\dot{\omega}} = \sigma_{\dot{\omega}} f^2 B_m^2 G \cdot \gamma$



Індукційна плита — кухонна електрична плита, що розігрівається безпосередньо перед залізовмісним посудом (а не конфорку, як у випадку з традиційною плитою) індукційованими вихровими токами, створюваними високочастотним магнітним полем частотою 20-100 кГц.



# Індукційний нагрів

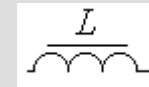


# ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРИСТРОЇ

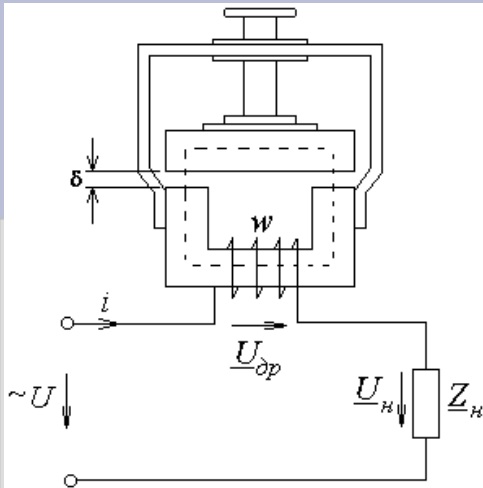
## ДРОСЕЛІ РЕГУЛЮВАЛЬНІ

*Дроселем* називають котушку з феромагнітним осердям і змінною індуктивністю, яка вмикається у коло змінного струму послідовно з навантаженням для регулювання струму або напруги Цей термін походить від німецького "drosseln" - обмежувати чи гасити.

$$Z_{\partial p} = \frac{U_{\partial p}}{I} = \sqrt{R_{\partial p}^2 + X_{\partial p}^2}$$



## Дросель з регульованим повітряним проміжком



$$R_M = R_{Mcm} + R_{M0} \approx R_{M0} = \frac{2\delta}{\mu_0 S}$$

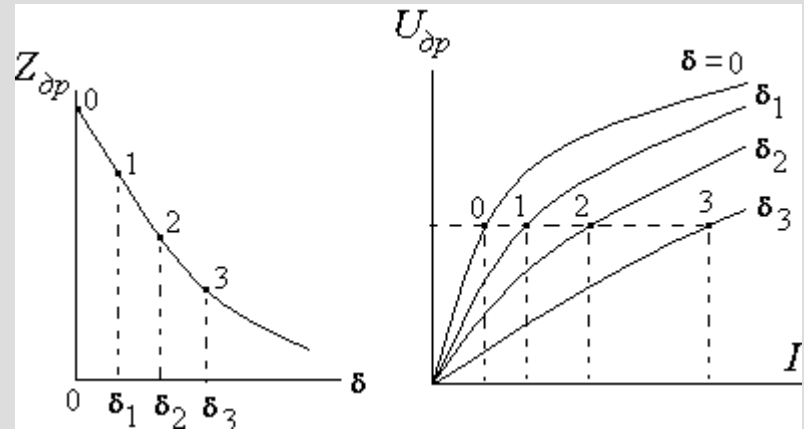
$$L = \frac{\Psi}{i} = \frac{w\Phi}{i}$$

$$\Phi = \frac{F}{R_M} = \frac{i \cdot w}{R_M}$$

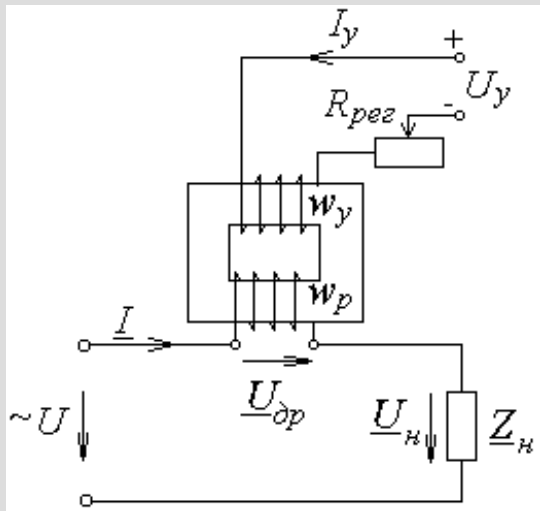
$$L = \frac{w^2}{R_M}$$

$$L_{\delta p} \approx \frac{\mu_0 \cdot S \cdot w^2}{2\delta}$$

$$X_{\delta p} = \omega \cdot L_{\delta p} \approx \frac{\mu_0 w^2 S \cdot \omega}{2\delta}$$



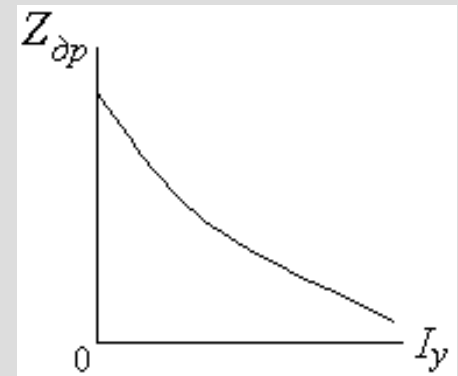
## Дроселі насичення



Змінення  $I_{кер}$  за допомогою регульовального реостата змінює ступінь насичення осердя, тобто його абсолютну магнітну проникливість  $\mu_a$  (зменшується зі збільшенням струму  $I_{кер}$ ), від значення якої залежить індуктивність дроселя

$$L_{\delta p} = w^2 \frac{\mu_a S}{l}$$

$$I_y \uparrow \Rightarrow \mu_a \downarrow \Rightarrow L_{\delta p} \downarrow \Rightarrow X_{\delta p} = \omega L_{\delta p} \downarrow \Rightarrow Z_{\delta p} \downarrow \Rightarrow I$$



## Енергія магнітного поля

$$\int_0^I Li di = \frac{LI^2}{2} \quad \text{енергія магнітного поля, що зосереджена в осерді}$$

$$LI = \psi = \Phi w \quad wI = F \quad \text{визначаємо питому магнітну енергію в осерді як}$$

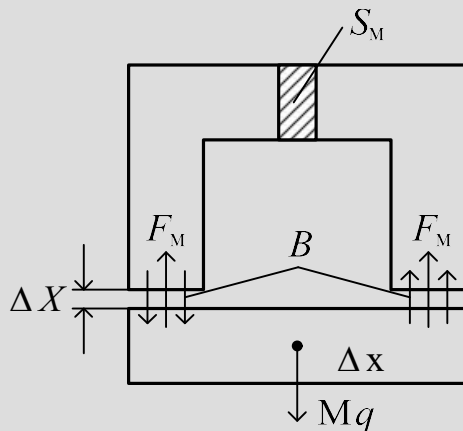
$$w_M = \frac{LI^2}{2S_{oc} l_{oc}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Phi}{S_{oc}} \cdot \frac{F}{l_{oc}} = \frac{BH}{2} = \frac{\mu_a H^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu_a}$$

Для немагнітного середовища (повітря, вакуум), в якому спостерігається індукція  $B$ , питома магнітна енергія

$$w_M = \frac{B^2}{2\mu_0} = 0,4B^2 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}, \quad \text{якщо } B \text{ [Тл].}$$

## Сила тяжіння магніту

Можна вважати, що тяжіння магніту (не має значення який це магніт: електричний чи постійний) починається при такому малому проміжку  $\Delta x$



, який не впливає на загальну МРС контура. Тобто індукція  $B$  вже не змінюється

Тоді, у міру тяжіння ваги масою  $M$ , енергія магнітного поля в проміжку переходить в роботу сил тяжіння  $F_M$  і буде їй дорівнювати:

$$2 F_M \Delta x = w_M \cdot 2 S_M \Delta x$$

$$\text{Звідси сила тяжіння магніту} \quad F_M = 0,4 B^2 S_M 10^6 \quad [\text{Н}], \quad \text{якщо}$$

$$B \text{ [Тл]}, \quad S_M \text{ [м}^2\text{]}.$$

## Електромагніти силові

До силових відносять тягові, вантажопідйомні і гальмівні електромагніти, що перетворюють електричну енергію у механічну.

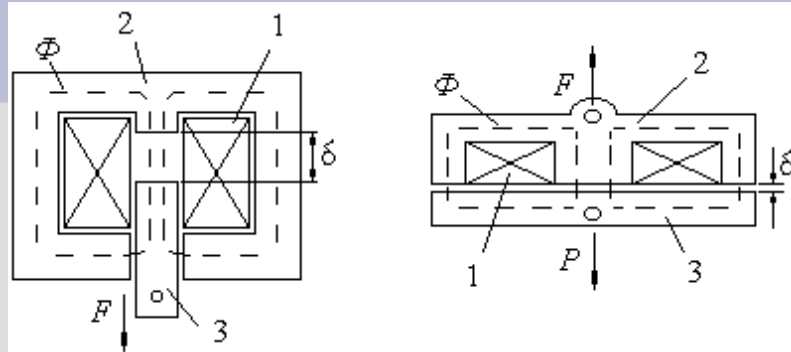
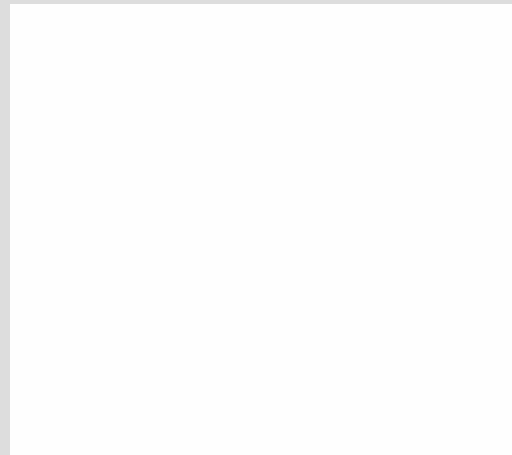


Схема тягового (а) і вантажопідйомного (б) електромагнітів: 1 – обмотка; 2 – осердя; 3 – якір

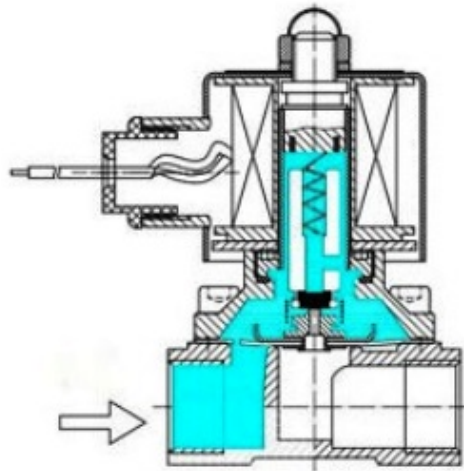
Сила тяги одного полюса електромагніта:

$$F = \frac{P}{2} = \frac{B^2 S}{2 \cdot \mu_0} = \frac{\Phi^2}{2 \cdot \mu_0 S}$$

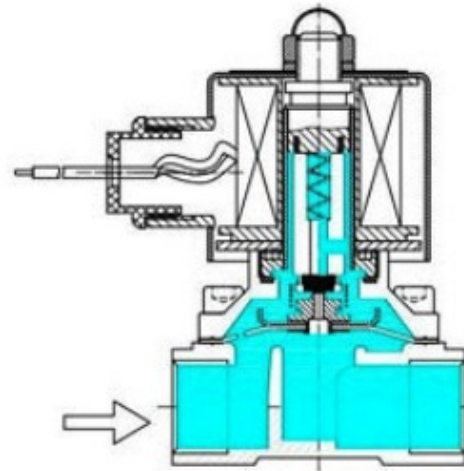


## Електромагнітні клапани

Ток через катушку отсутствует -  
трубопровод перекрыт

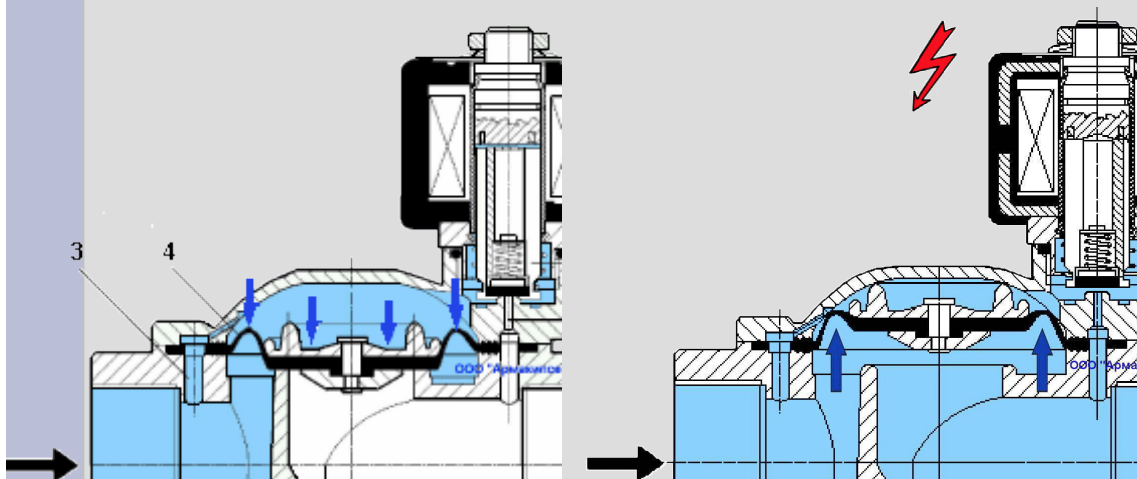


Ток через катушку подан -  
трубопровод открыт



Нормально-закрытый клапан прямого действия

Електромагнітний клапан являє собою вид запірно-регулюючої арматури, яка монтується на трубопровід з метою дистанційного відкриття / закриття потоку: стисненого повітря, пара, води (гарячої й холодної, технічної), тосола, нафтопродуктів, масла, спирту та ін.



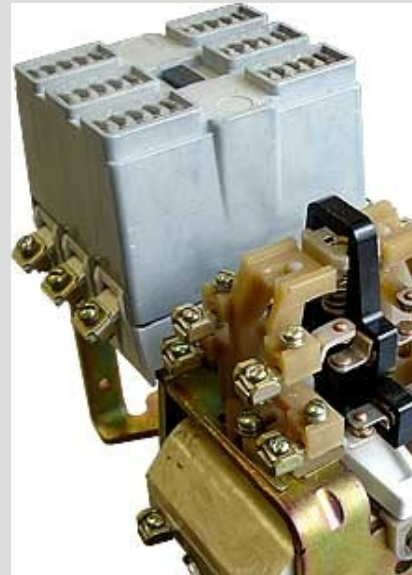
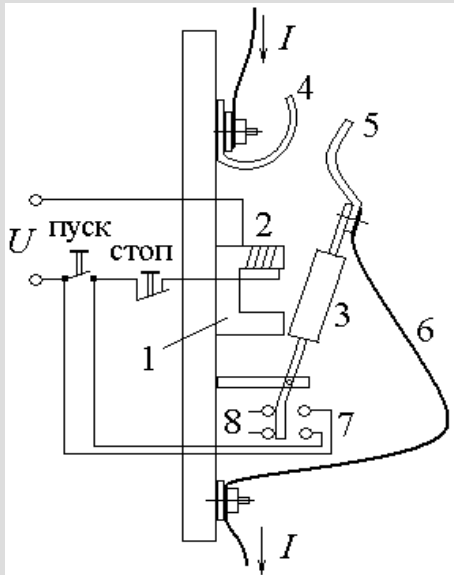
## Електричні апарати

Електричні апарати — це електротехнічні пристрої, які призначені для включання — виключання і захисту електричних кіл

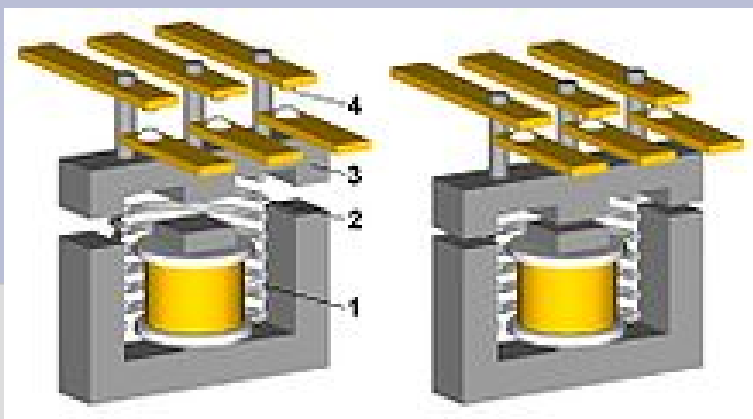


## Контактори

Контактор – двопозиційний апарат, призначений для частих вмикань та вимикань електродвигунів та інших силових кіл змінного струму з напругою до 660 В і кіл постійного струму з напругою до 440 В. По суті контактор – це вимикач з електромагнітним керуванням. Його головні (лінійні) контакти, які вмикаються послідовно у силове коло, замикаються силою тяги електромагніта зі струмом у допоміжному (оперативному) колі.

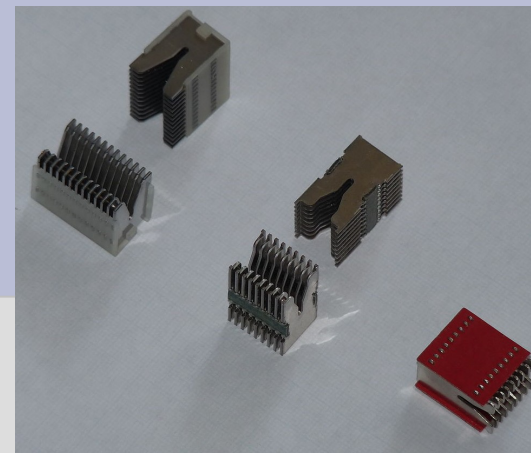


Якщо замкнути коло паралельно ввімкнутій у коло котушки 2 електромагніта 1 (натисканням кнопки «Пуск»), то сталевий яр 3 притягнеться до осердя і замкнуться головні контакти 4, 5 (рис.7.5,а). В результаті через гнучкий провідник 6 замкнеться силове коло зі струмом  $I$  у навантаженні, наприклад електродвигун з джерелом живлення. Одночасно перемикаються блокувальні контакти 7 і 8, і замикальні контакти 7 шунтують пускову кнопку. Відключення з поверненням його у вихідне положення під дією власної маси і зворотної пружини (при її наявності) здійснюється через розрив кола струму в котушці 2 (натисканням кнопки «Стоп»)



Принципова схема конструкції трифазного контактора:

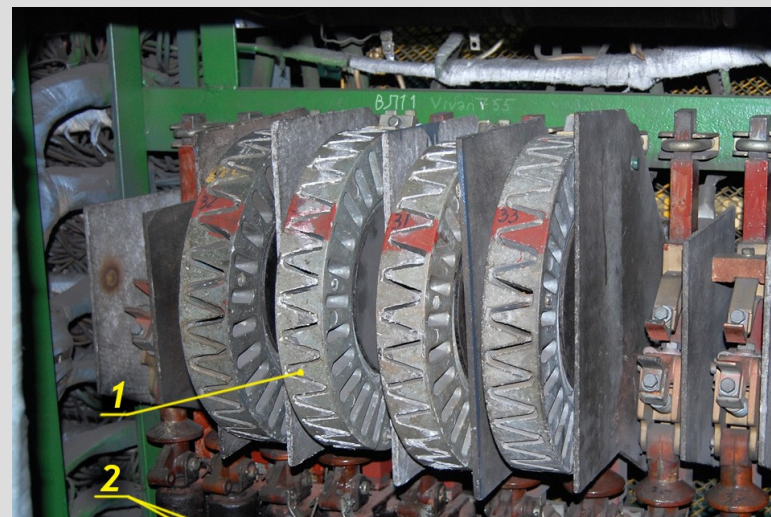
- 1 — Котушка
- 2 — Пружина
- 3 — Рухома частина
- 4 — Контакті, що замикаються



Дугогасні ґрати різних модульних автоматичних вимикачів



Контактор 9А для установки на DIN рейку

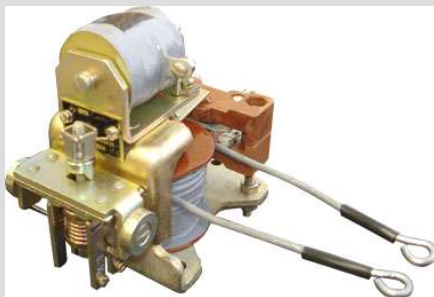


Потужні контактори постійного струму з дугогасильними камерами і без

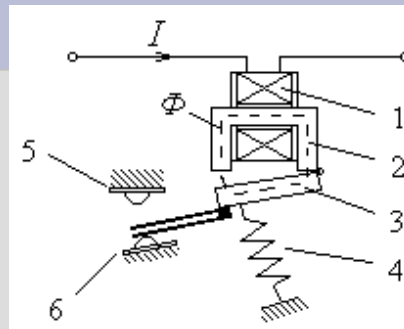
## Реле електричні

Електричним реле називають апарат, призначений для автоматичного спрацьовування (включення або відключення) при зміні якогось електричного параметра кола (струму, напруги тощо) або неелектричного параметра, на який він має реагувати

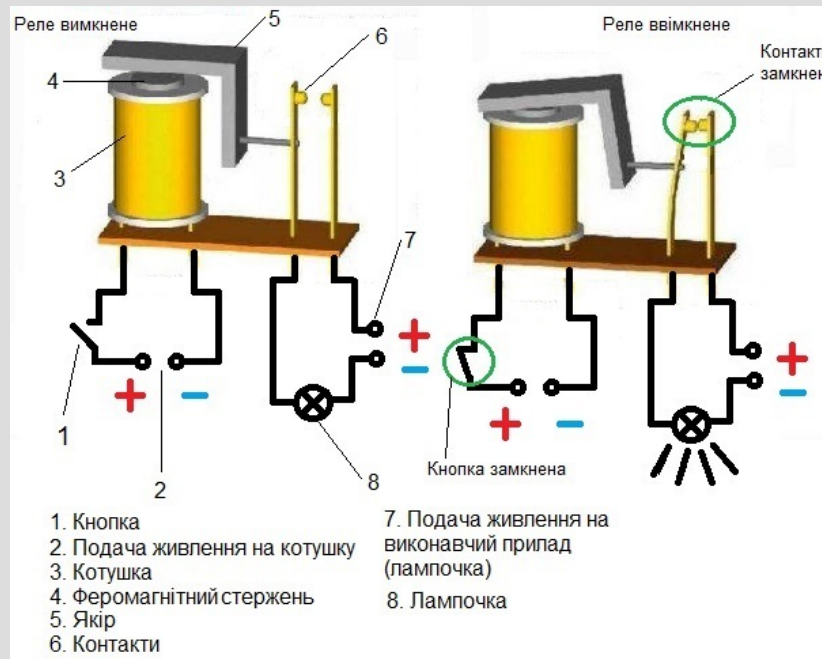
### Реле максимального струму



Реле максимального струму серії РЕВ570 та реле максимального струму з самоповерненням РЕМ65



Конструктивна схема реле максимального струму: 1 – обмотка; 2 – осердя; 3 – ярів; 4 – пружина; 5 – контакти замикальні; 6 – контакти розмикальні



Кнопка може знаходитись на пульті управління, реле в електричному щиті, а виконавчий механізм (електричний двигун, лампочка) там де він необхідний. Це робить процес комутації більш безпечнішим та зручним.

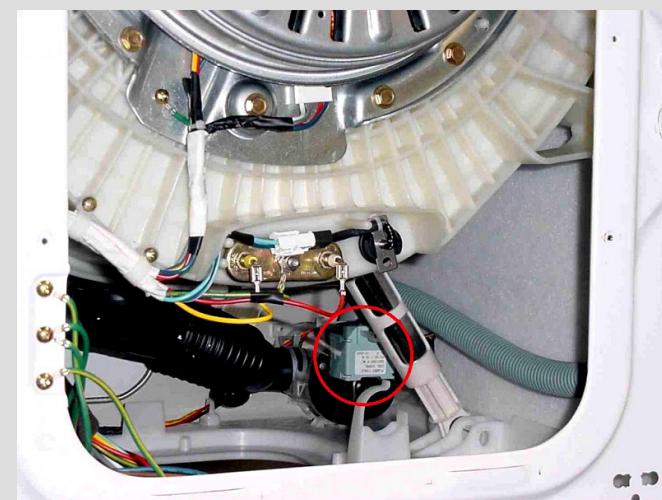
### Електромагнітне реле



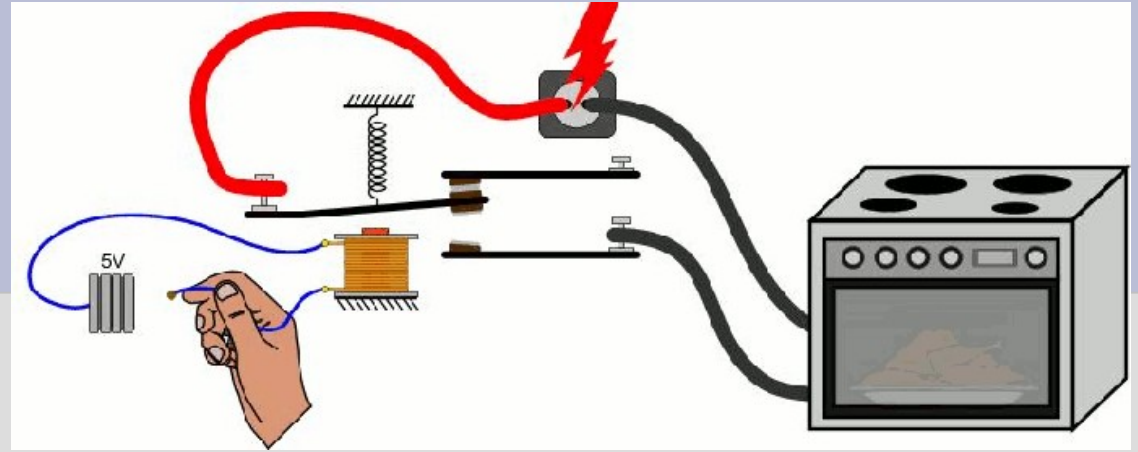
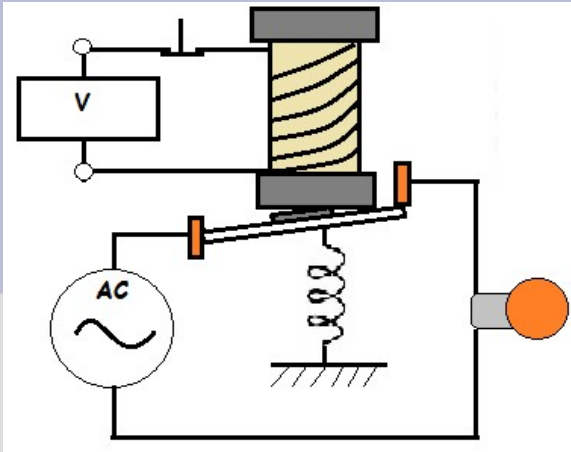
Електромагнітне реле



Реле змінного струму широко застосовуються в промисловому устаткуванні та побутовій техніці.

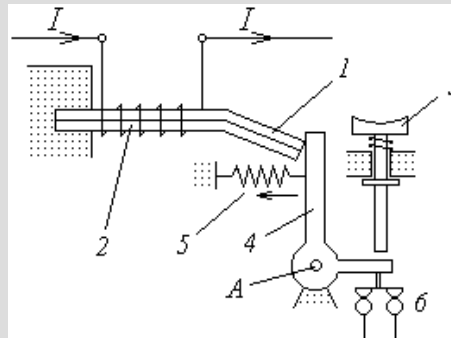


На фото (обведено червоним) показано, де знаходиться одне з реле у пральній машині



## Тепловое реле

Теплове реле призначено для захисту електроапаратури від тривалих перевантажень



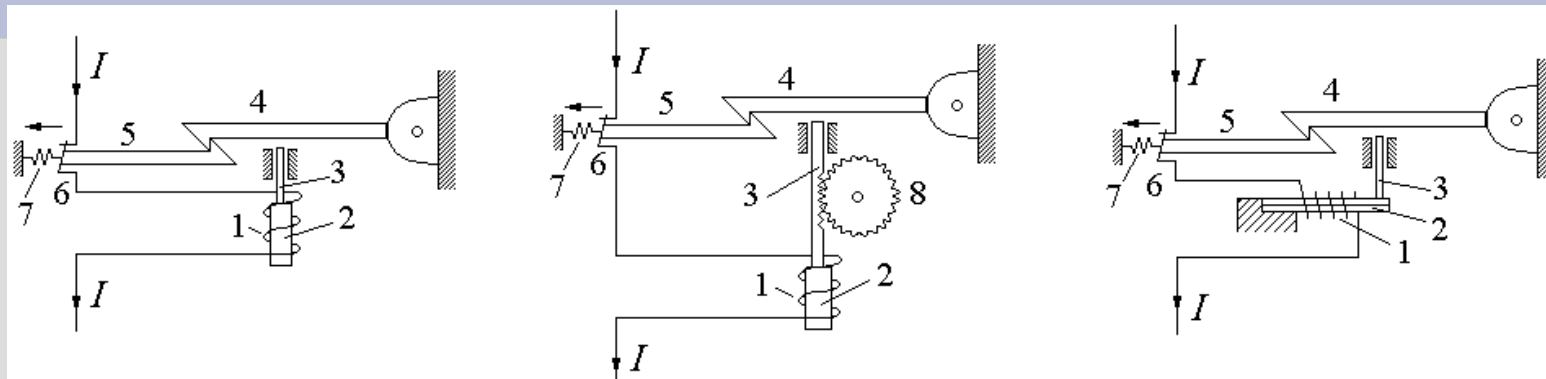
При нагріві біметалічна пластина 1 у нагрівачу 2 (ніхромова проволочка) деформується, її зігнутий кінець піднімається і вивільняє важіль 4 при спрацьовуванні. Важіль 4 обертається пружиною 5 вліво відносно осі А і своїм кінцем розмикає нормально замкнені контакти 6 кола керування двигуна. Після охолодження пластини протягом 3-5 мін вихідний стан реле може бути відновлений натисканням на кнопку повернення 3



реле теплове РТТ – 141 (б)

## Повітряні автоматичні вимикачі

Повітряний автоматичний вимикач (автомат) – це комплектний комутаційний апарат багаторазової дії, який складається з силових контактів з дугогасильним пристроєм, механізму вільного розчеплення, елементів захисту – розчіплювачів та привода. В електричних колах вони виконують функції рубильника та запобіжника



автомат з *електромагнітним* розчіплювачем максимального струму

електромагнітний розчіплювач максимального струму годинниковим механізмом 8, який гальмує переміщення ударника 3 при струмах спрацьовування на заданий час

автомат з тепловим розчіплювачем



Загальний вигляд установочних автоматів серій А 3700 (а), ВА-СЭЩ (б) та ВА57-39 (в)

***Thanks for your attention***