



# ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ ПРИСТРОЇ

*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  $\vec{B}$   $B = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S}$   $B = \frac{\Phi}{S}$

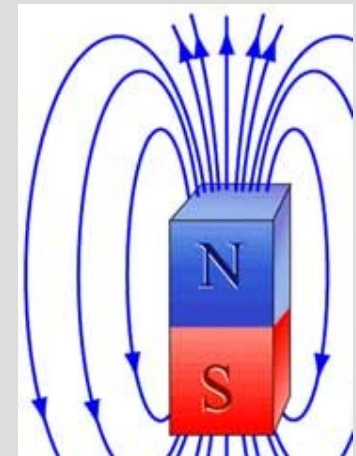
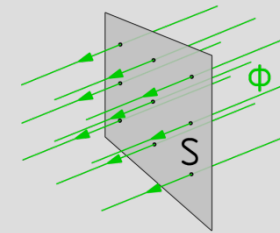
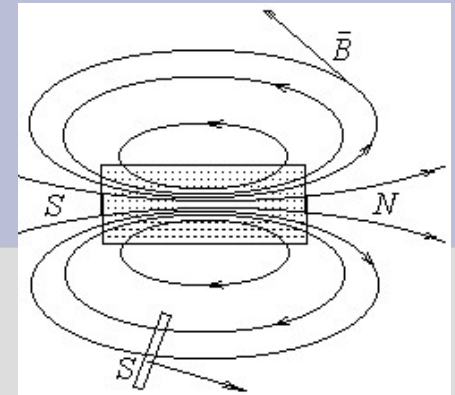
Напруженість магнітного поля  $\vec{H}$   $\vec{B} = \mu_a \vec{H}$

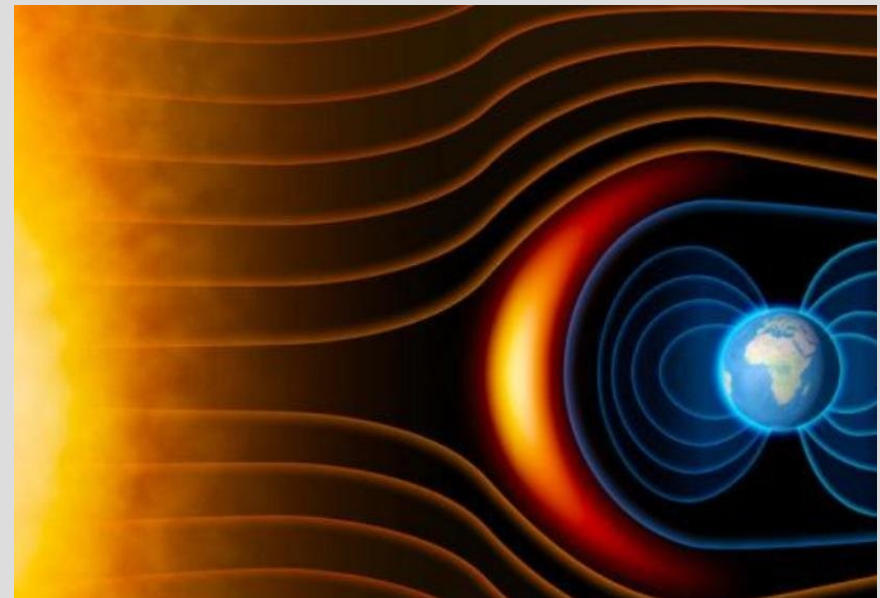
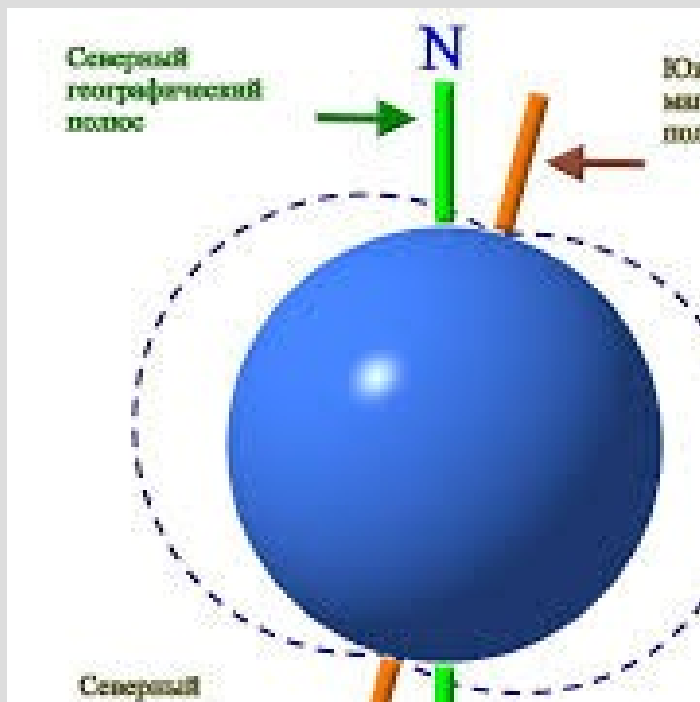
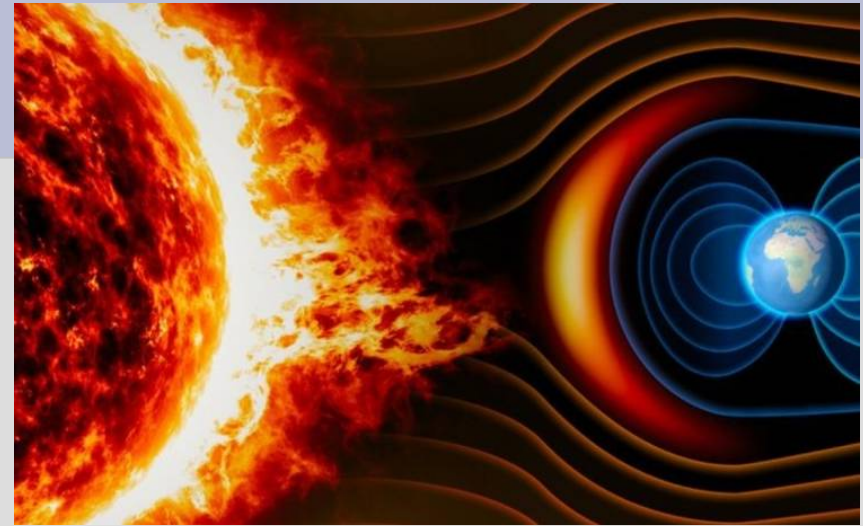
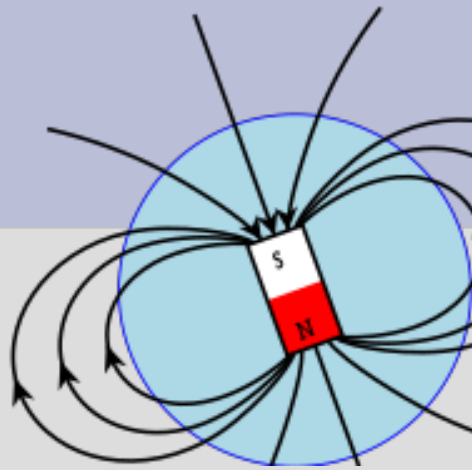
Відносна магнітна проникливість  $\mu_r = \mu_a / \mu_0$ ,

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

Потік вектору індукції магнітного поля через замкнену поверхню

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

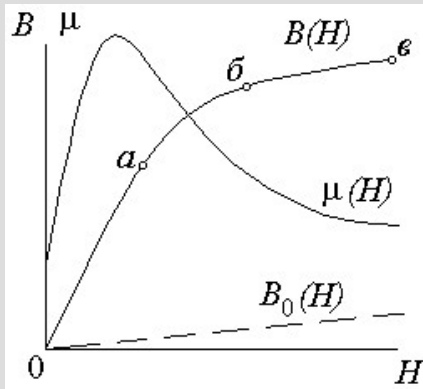




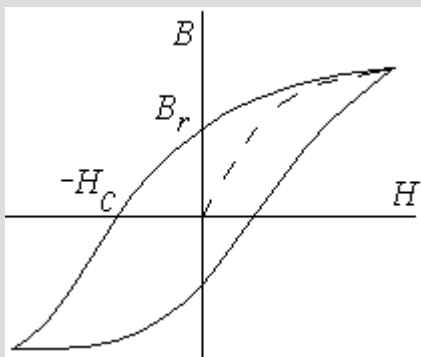
# Магнітні властивості матеріалів

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

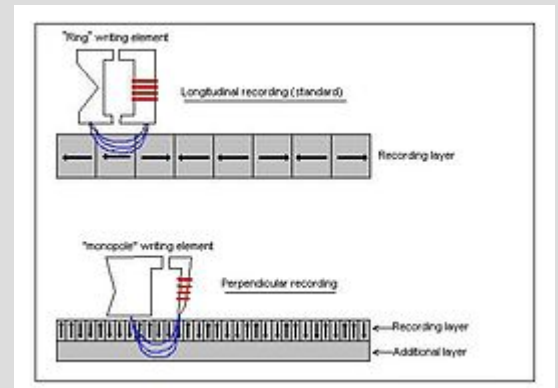
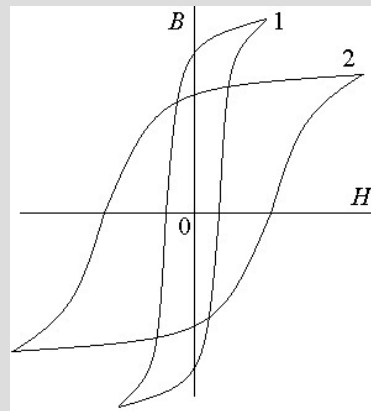
*Магнітні матеріали* (ферромагнетики): відносна магнітна  
проникливість  $\mu_r \gg 1$ .

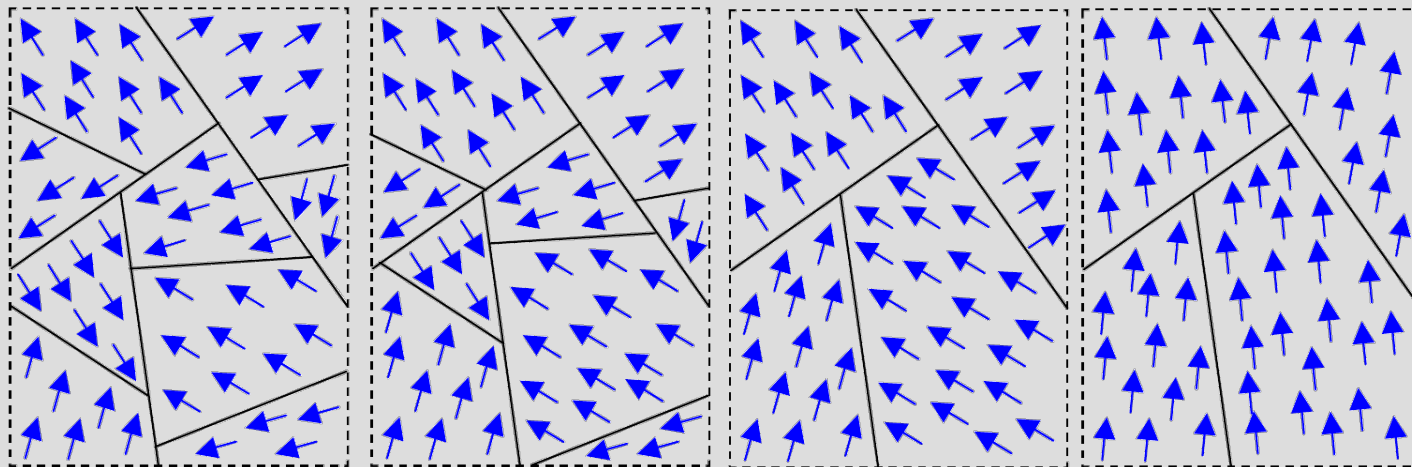
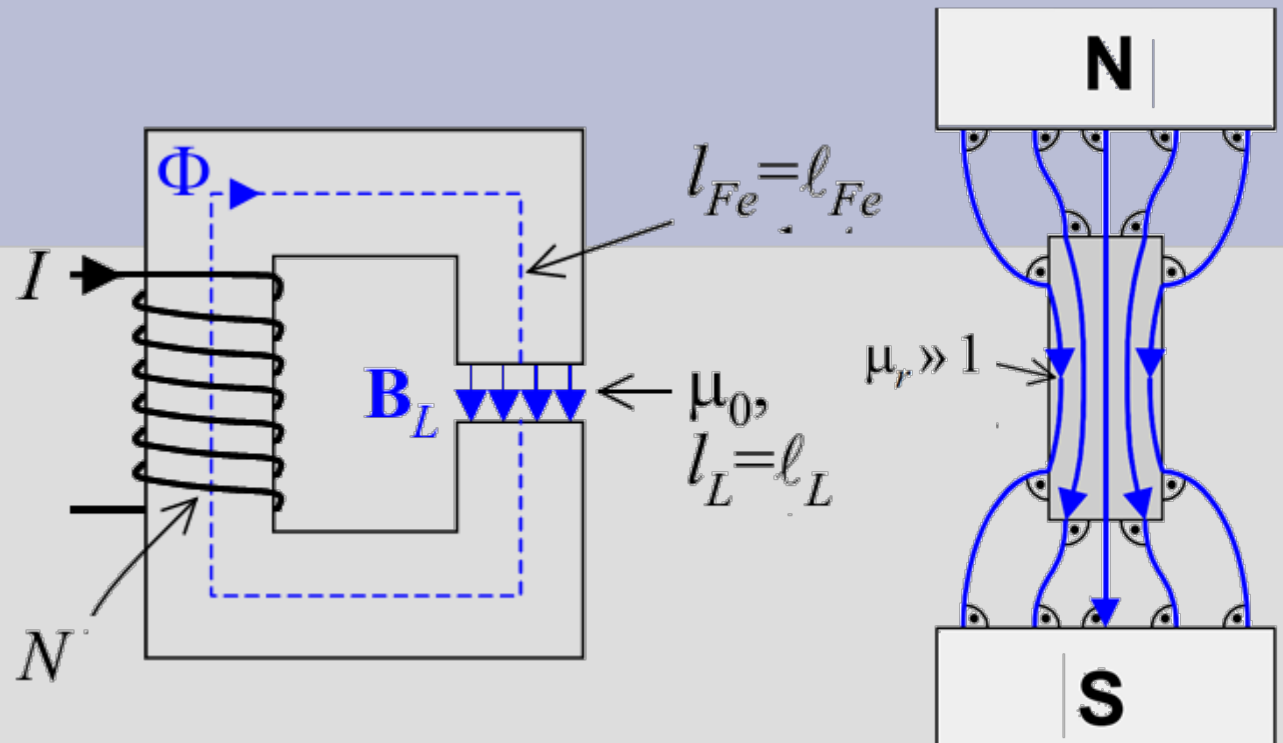
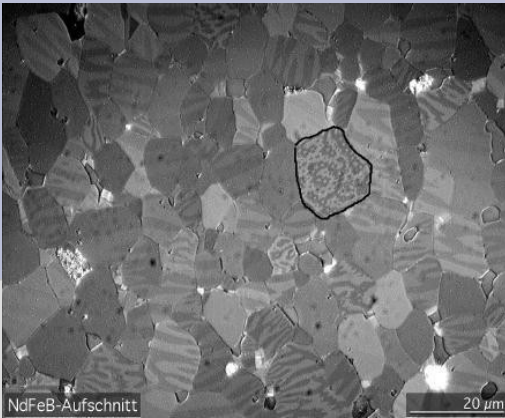


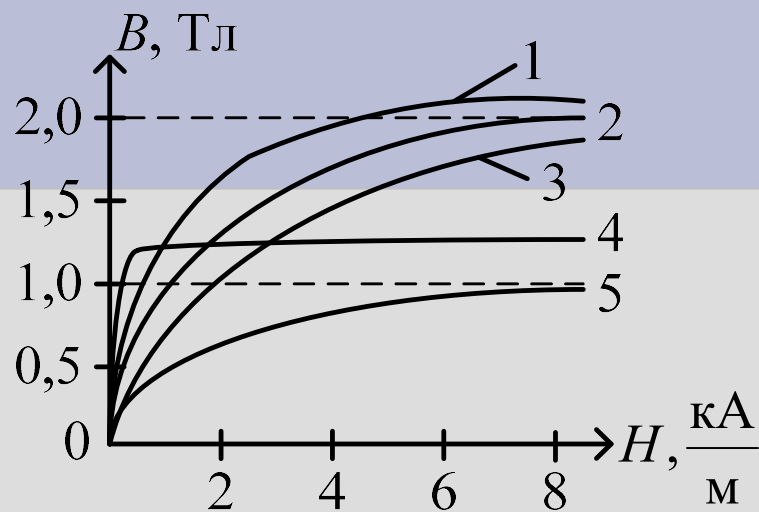
Крива намагнічування  $B(H)$  та  
залежність  $\mu(H)$  для ферромагнетиків



Петля гістерезису

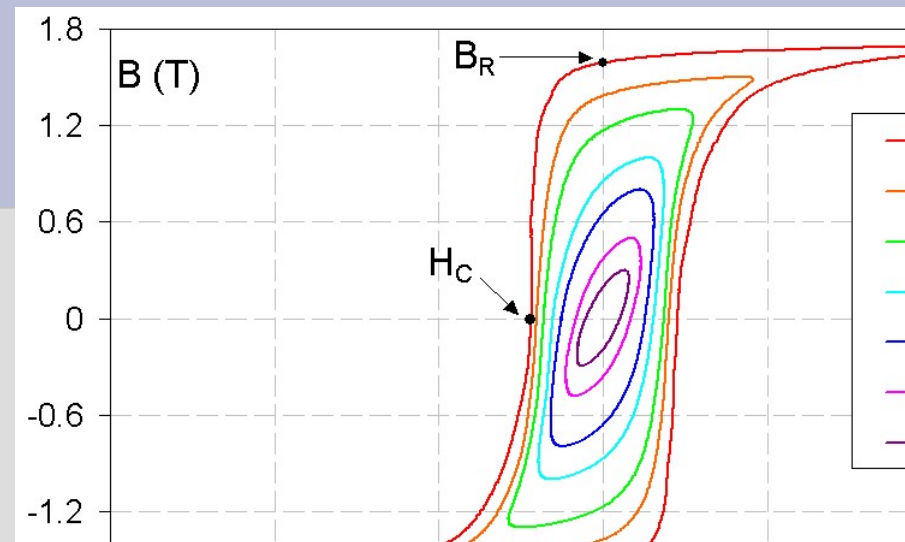






Ряд кривих намагнічування показано на рисунку:

- 1 – холоднокатана листова електротехнічна сталь;
- 2 – гарячекатана листова 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

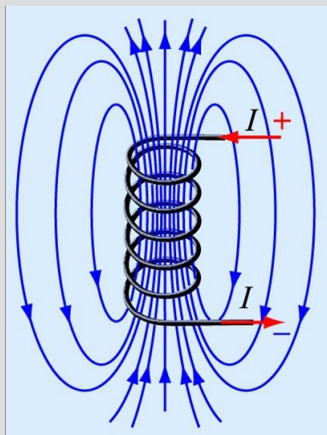
## Закон електромагнітної індукції

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

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

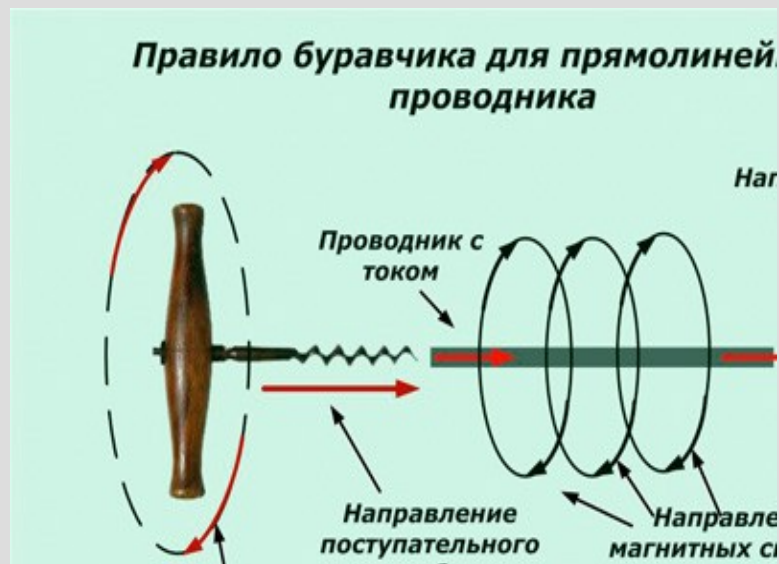
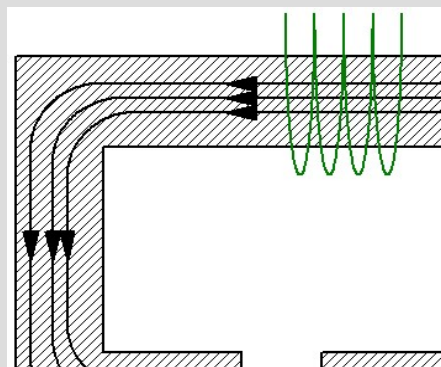
### Правило Ленца

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



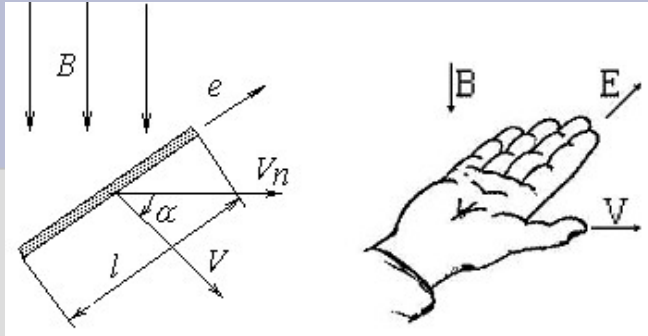
Магнітне поле багатовиткової обмотки

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



## Закон електромагнітної індукції

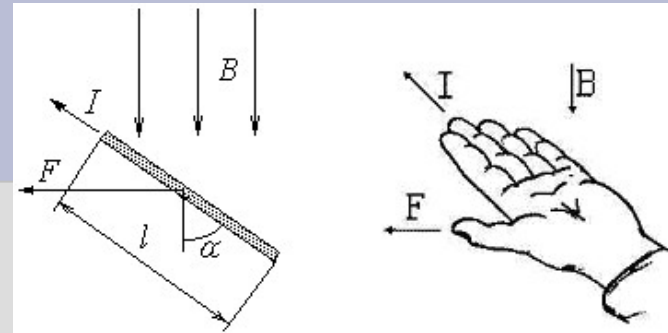
$$E = B \cdot l \cdot V \sin \alpha$$



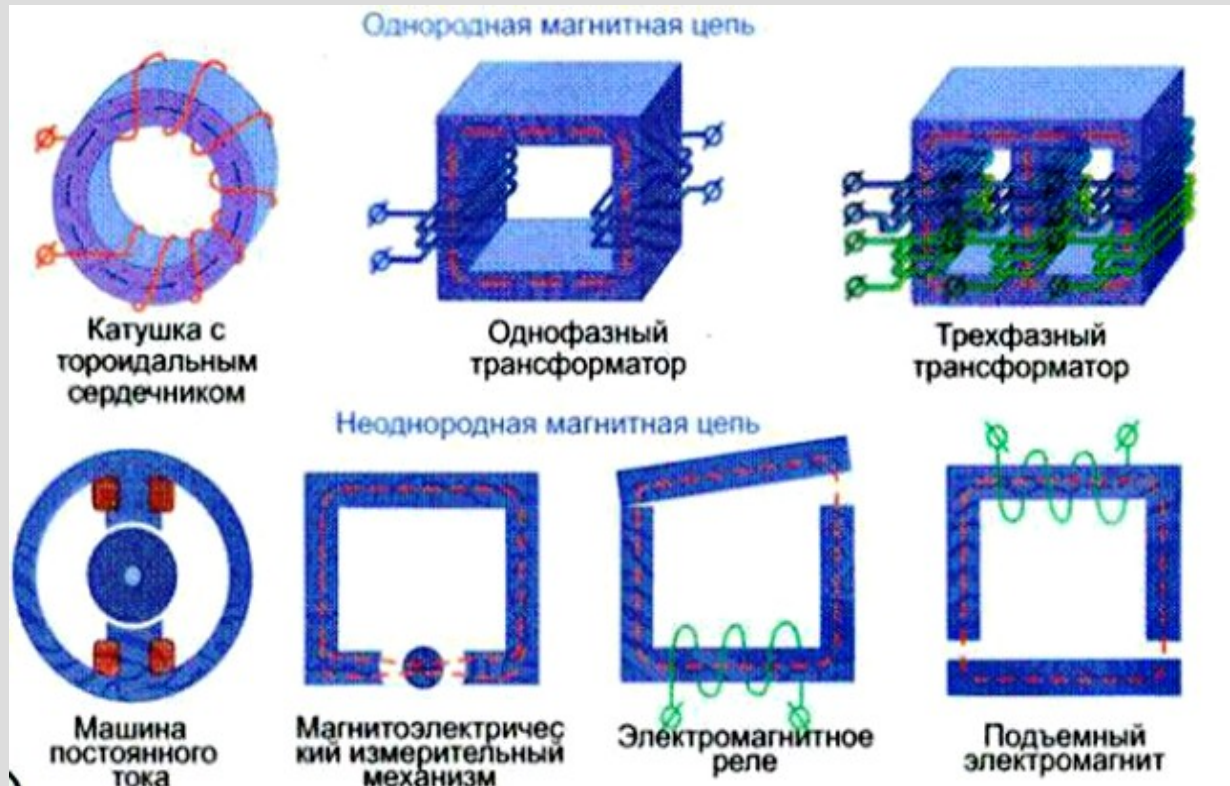
*правило правої руки*

## Закон Ампера

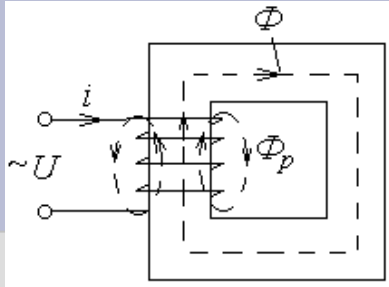
$$F = B \cdot l \cdot I \sin \alpha$$



*правило лівої руки*



# МАГНІТНІ КОЛА ЗІ ЗМІННОЮ МАГНІТОРУШІЙНОЮ СИЛОЮ



## Втрати потужності дросселя

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

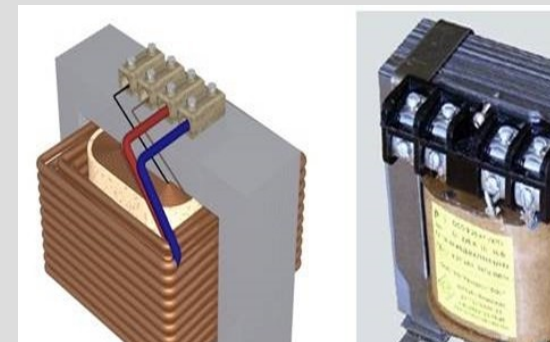
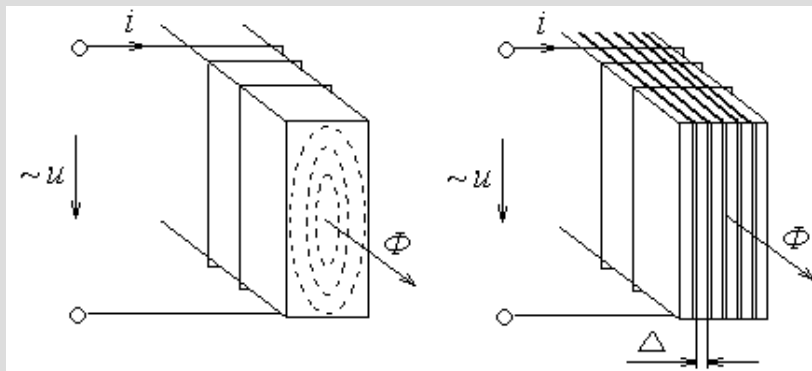
$\Delta P_i = I^2 R$  — потужність, що витрачається в активному опорі обмотки.  
Її називають втратами у міді

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

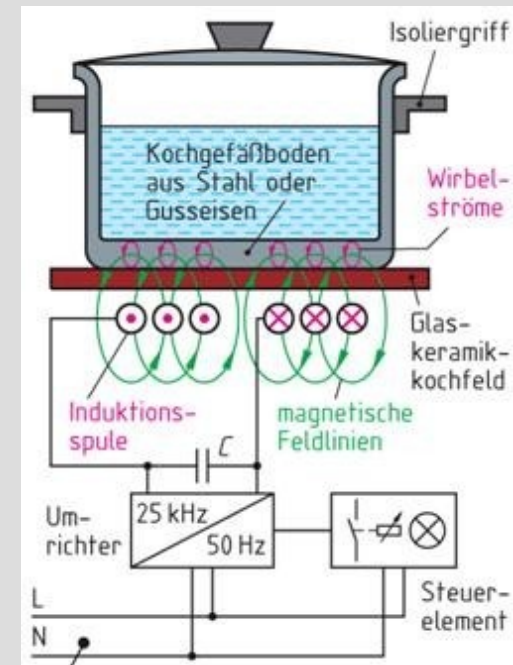
$$\Delta P_{\dot{n}\dot{o}} = P_{\dot{a}} + P_{\dot{a}\dot{o}}$$

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

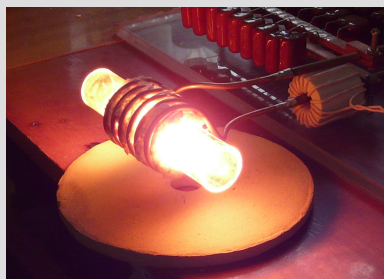
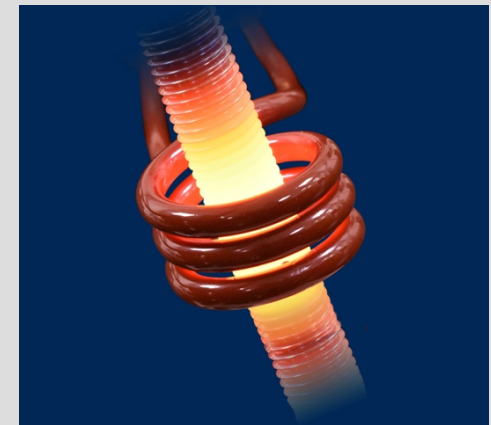
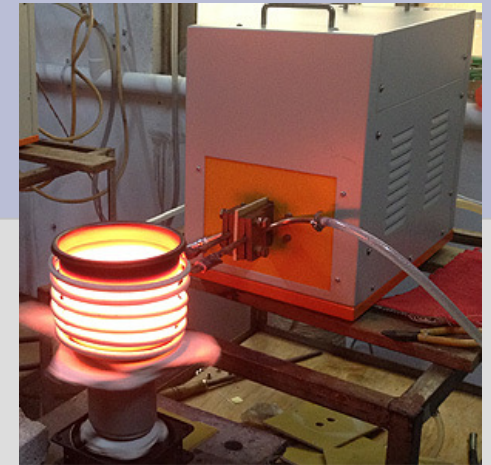
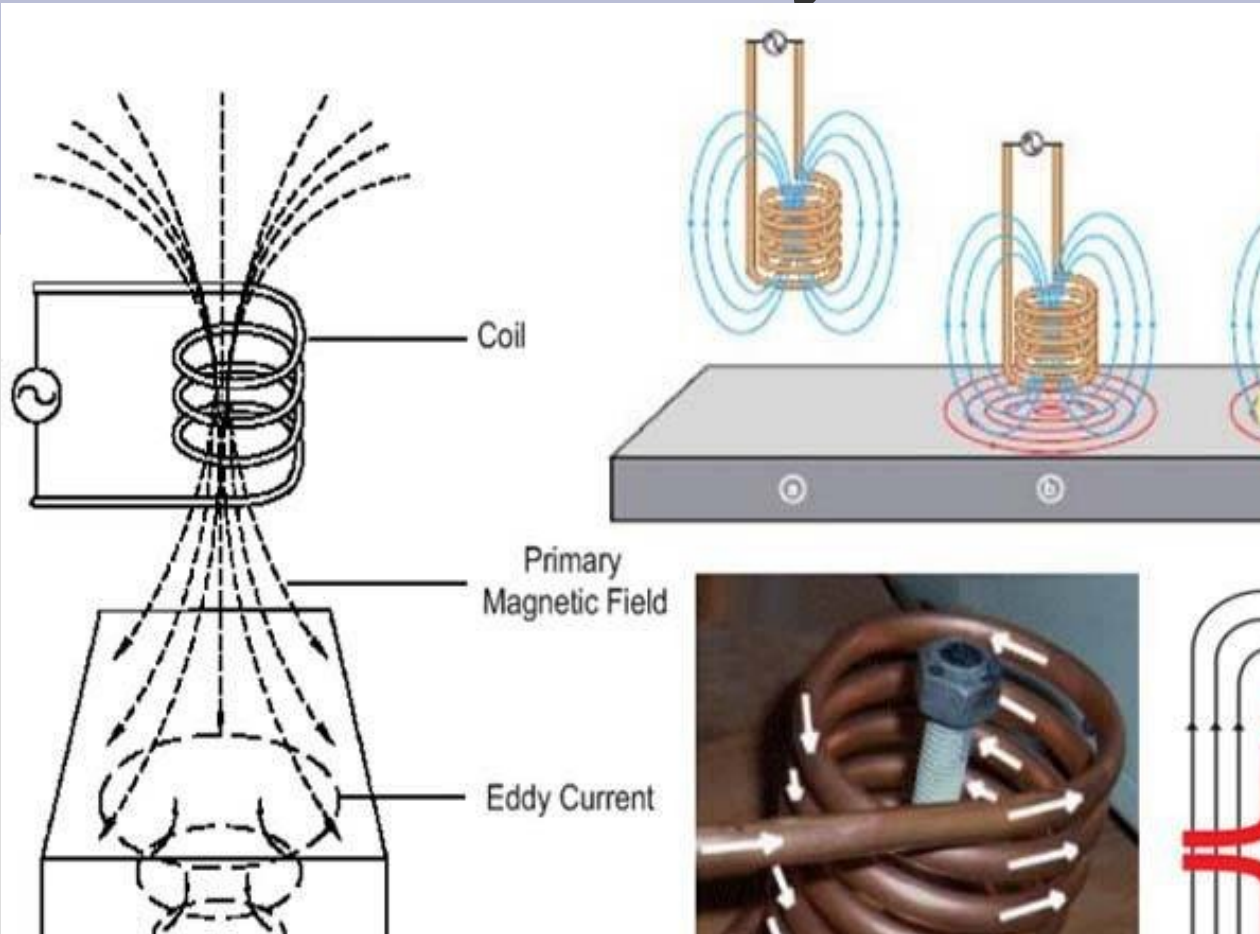
$P_{\dot{a}\dot{o}}$  — втрати на вихрві струми.  $P_{\dot{a}\dot{o}} = \sigma_{\dot{a}\dot{o}} f^2 B_m^2 G \cdot \gamma$



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



## Електромагніти силові

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

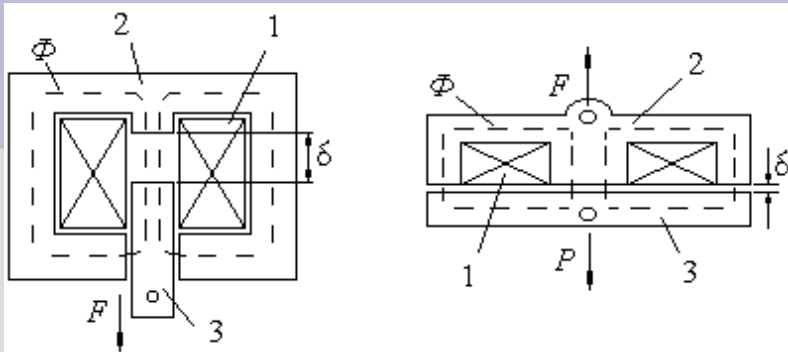


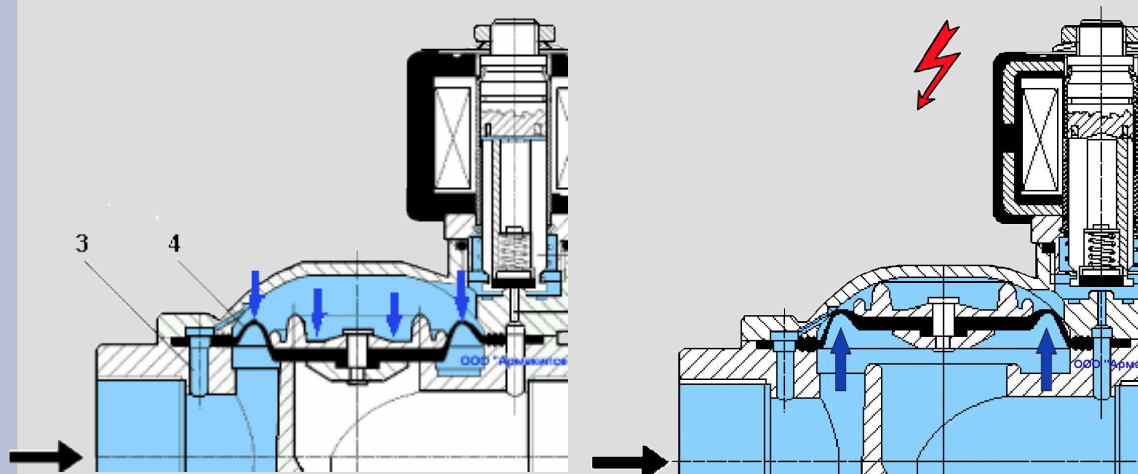
Схема тягового (а) і вантажопідйомного (б) електромагнітів: 1 – обмотка; 2 – осердя; 3 – яр

Сила тяги одного полюса електромагніта:

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



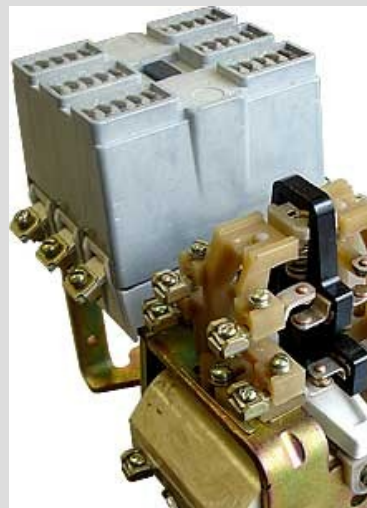
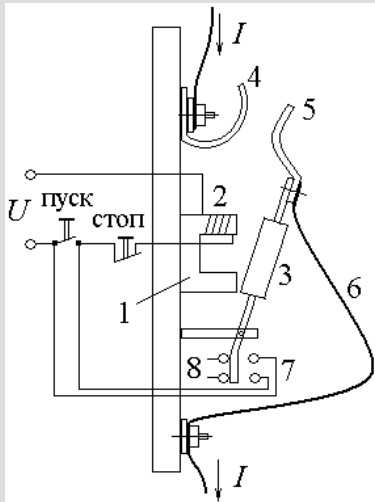
## Електромагнітні клапани



# Комутаційні, пускорегулювальні та захисні апарати

## 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.

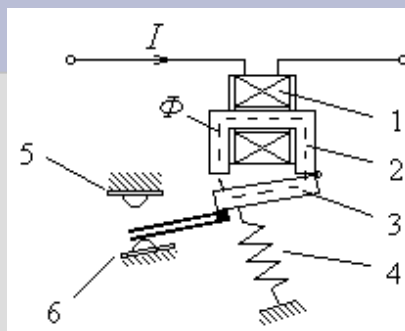


Якщо замкнути коло паралельно ввімкнутій у коло котушки 2 електромагніта 1 (натисканням кнопки «Пуск»), то сталевий якор 3 притягнеться до осердя і замкнуться головні контакти 4, 5 (рис.7.5,а). В результаті через гнучкий провідник 6 замкнеться силове коло зі струмом  $I$  у навантаженні, наприклад електродвигун 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»)

## Реле захисні

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

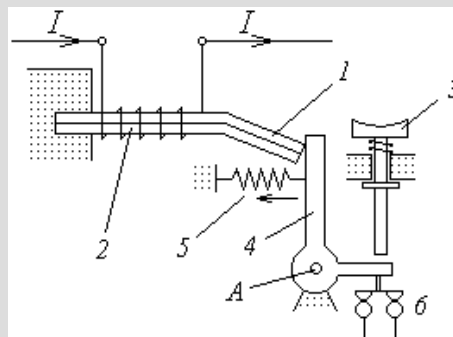
### Реле максимального струму



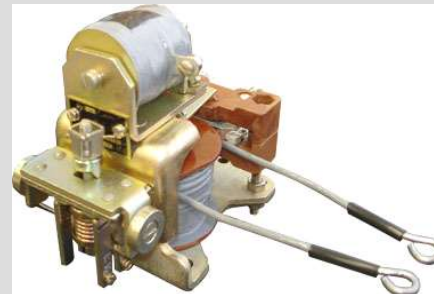
Конструктивна схема реле максимального струму: 1 – обмотка; 2 – осердя; 3 – ярі; 4 – пружина; 5 – контакти замикальні; 6 – контакти розмикальні

### Тепловое реле

Теплове реле призначено для захисту електроапаратури від тривалих перевантажень



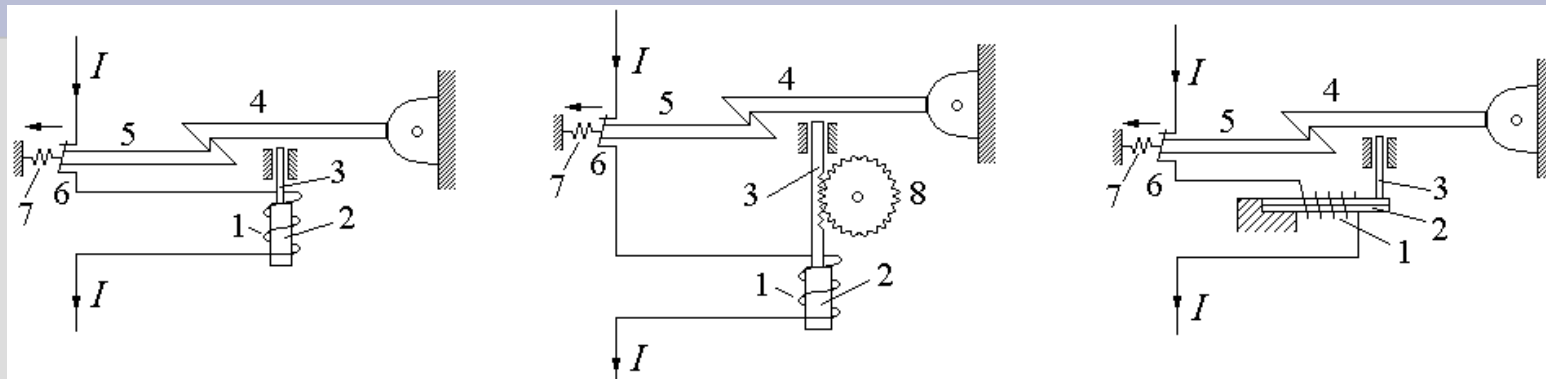
При нагріві біметалічна пластина 1 у нагрівачу 2 (ніхромова проволочка) деформується, її зігнутий кінець піднімається і вивільняє важіль 4 при спрацьовуванні. Важіль 4 обертається пружиною 5 вліво відносно осі А і своїм кінцем розмикає нормально замкнені контакти 6 кола керування двигуна. Після охолодження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



Реле максимального струму серії РЕВ570 (а), реле теплове РТТ – 141 (б) та реле максимального струму з самоповерненням РЕМ65

## 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



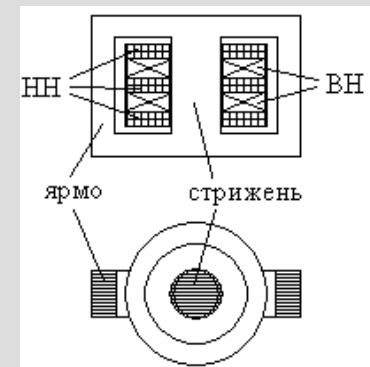
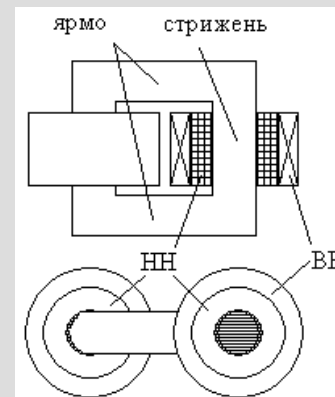
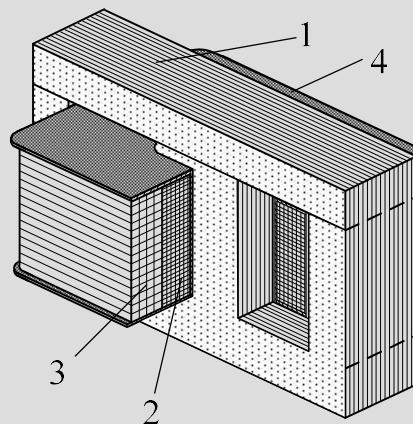
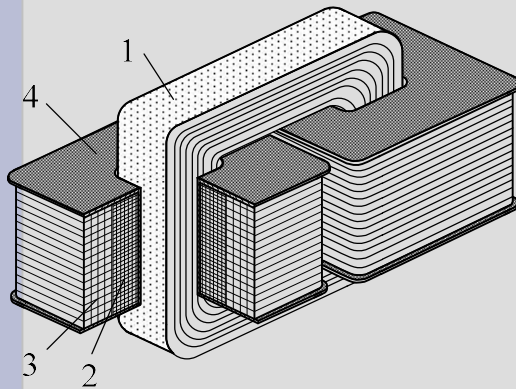
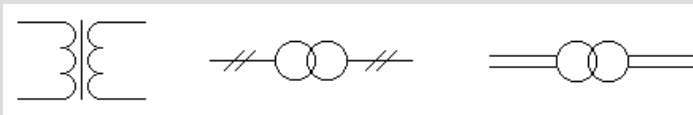
Загальний вигляд установочних автоматів серій А 3700 (а), ВА-СЭЩ (б) та ВА57-39 (в)

# ТРАНСФОРМАТОРИ

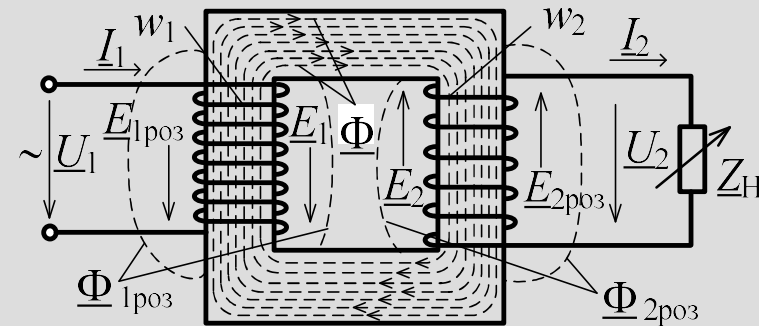
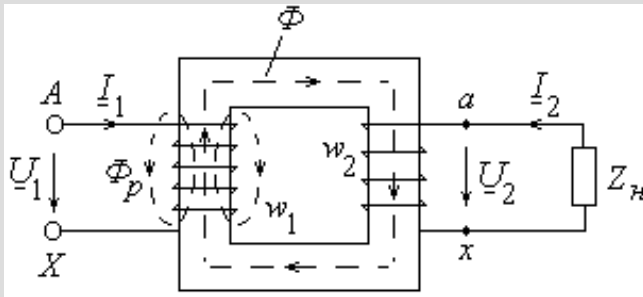
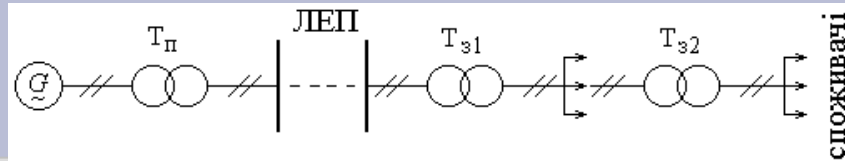
Трансформатор – це статичний електромагнітний пристрій, призначений для перетворення змінних напруги і струму по величині із збереженням їх частоти



Однофазний двообмотковий трансформатор



## Схема передачі електроенергії від електростанції до споживачів



$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad E_1 = 4,44 \cdot w_1 \cdot f \cdot \Phi_m$$

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad E_2 = 4,44 \cdot w_2 \cdot f \cdot \Phi_m$$

$$k = \frac{e_{\text{BH}}}{e_{\text{HH}}} = \frac{E_{\text{BH}}}{E_{\text{HH}}} = \frac{w_{\text{BH}}}{w_{\text{HH}}}$$

три основні режими роботи трансформатора:  
неробочого ходу (НХ),  
короткого замикання (КЗ),  
навантаження



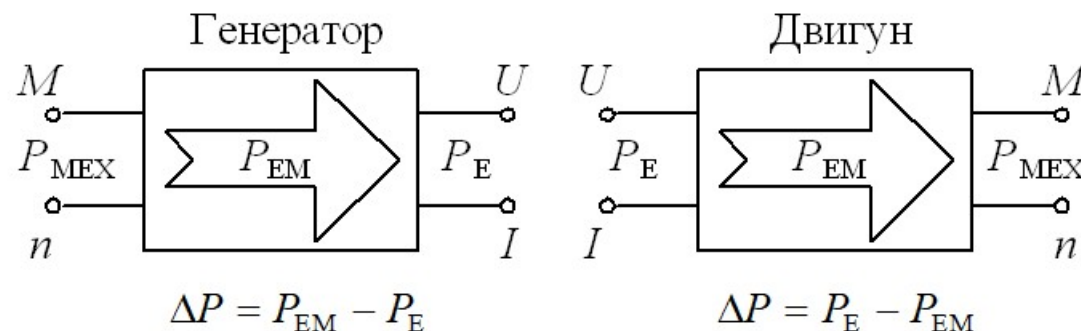
## ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

*Електричною машиною* називається електротехнічний пристрій, призначений для електромеханічного перетворення енергії. У залежності від напрямку перетворення енергії розрізняють: *генератори* – електричні машини, що перетворюють механічну енергію в електричну; *двигуни* – електричні машини, що перетворюють електричну енергію в механічну.

Електричним машинам, як і трансформаторам, властивий *принцип оборотності*, тобто одна й та же електрична машина в залежності від напрямку перетворення енергії може бути генератором або двигуном.

### Загальні поняття

Крім вхідних і вихідних видів потужності: електричної  $P_E = UI$  та механічної  $P_{\text{МЕХ}} = M \cdot n$  ( $M$  – момент на валу;  $n$  – частота обертання) – в процесі електромеханічного перетворення енергії ключове значення має електромагнітна потужність  $P_{\text{ЕМ}} = EI$ , яка відповідає силовій взаємодії струмів і магнітного поля в середині електричної машини.



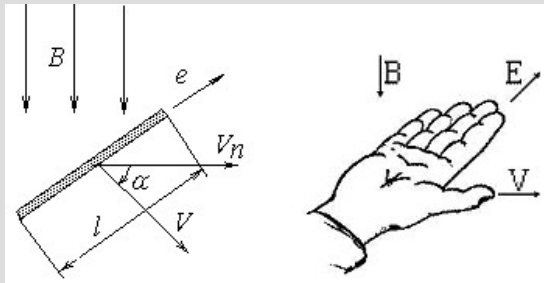
У наслідок того, що потужності  $P_{EM}$  і  $P_{MEH}$  визначаються однаковим моментом  $M$ , вони близькі одна до одної  $P_{EM} \cong P_{MEH}$  (різницю вносить частота обертання). Тому можна вважати, що втрати в електричній машині  $\Delta P$  утворює різниця електричної і електромагнітної потужностей.

### Види електричних машин

У залежності від струму живлення розрізняють *електричні машини постійного струму* і *електричні машини змінного струму*.

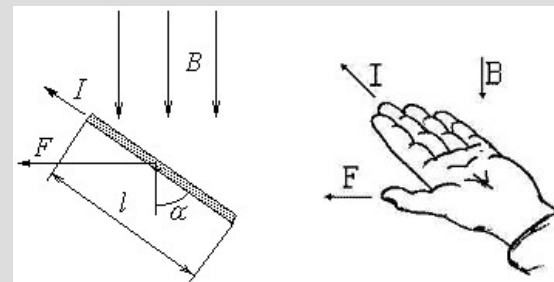
### Закон електромагнітної індукції

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

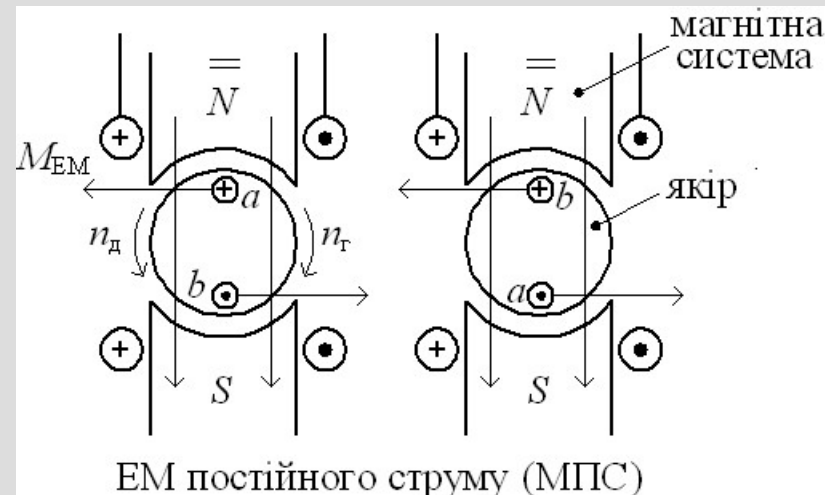


### Закон Ампера

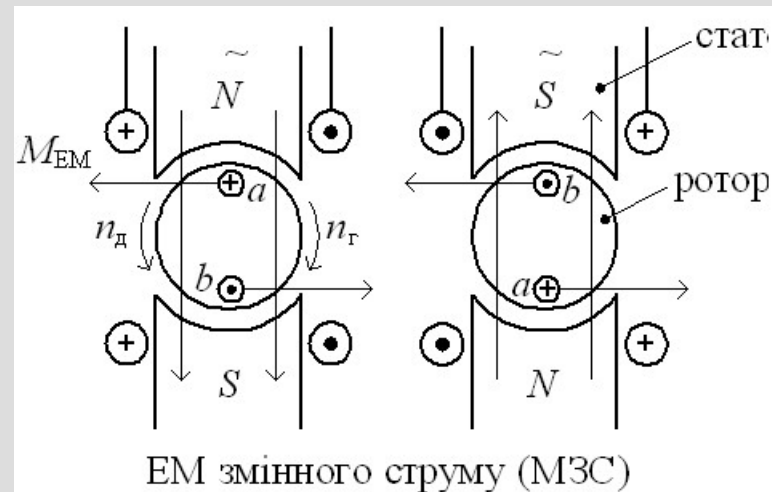
$$F = B \cdot l \cdot I \sin \alpha$$



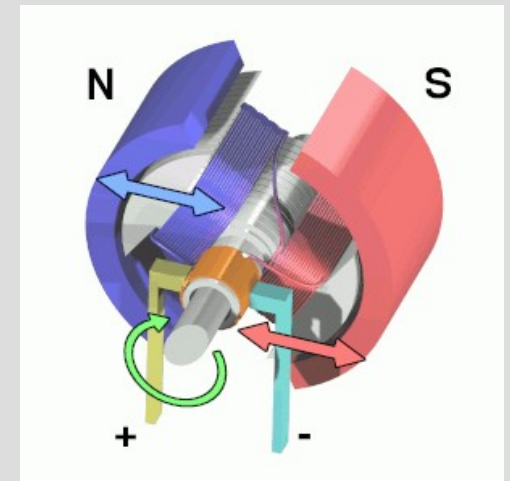
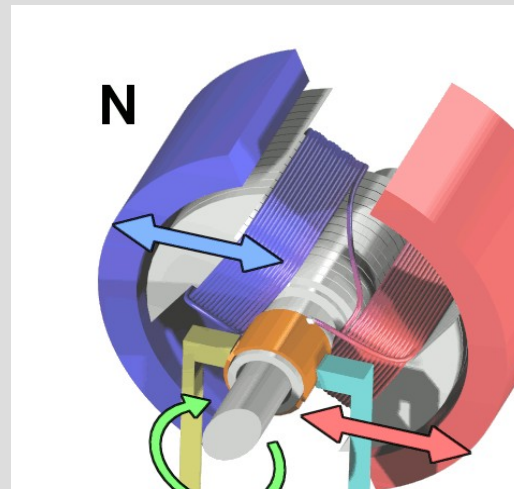
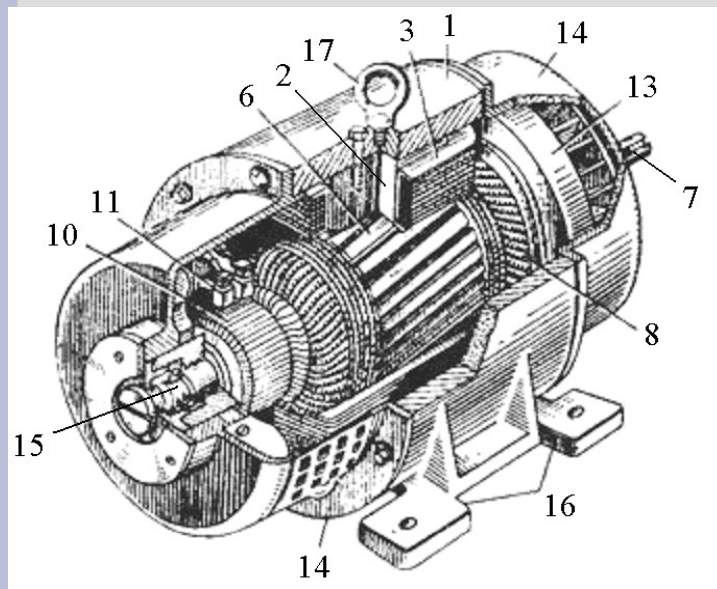
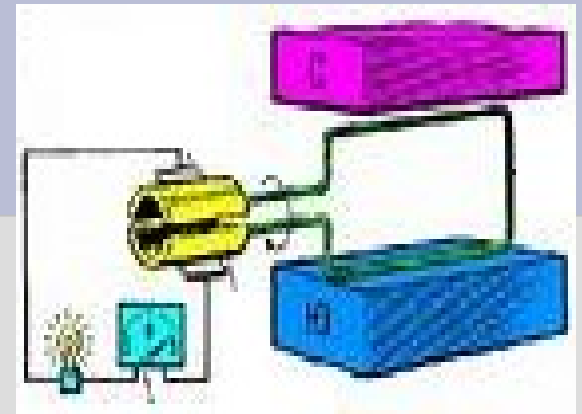
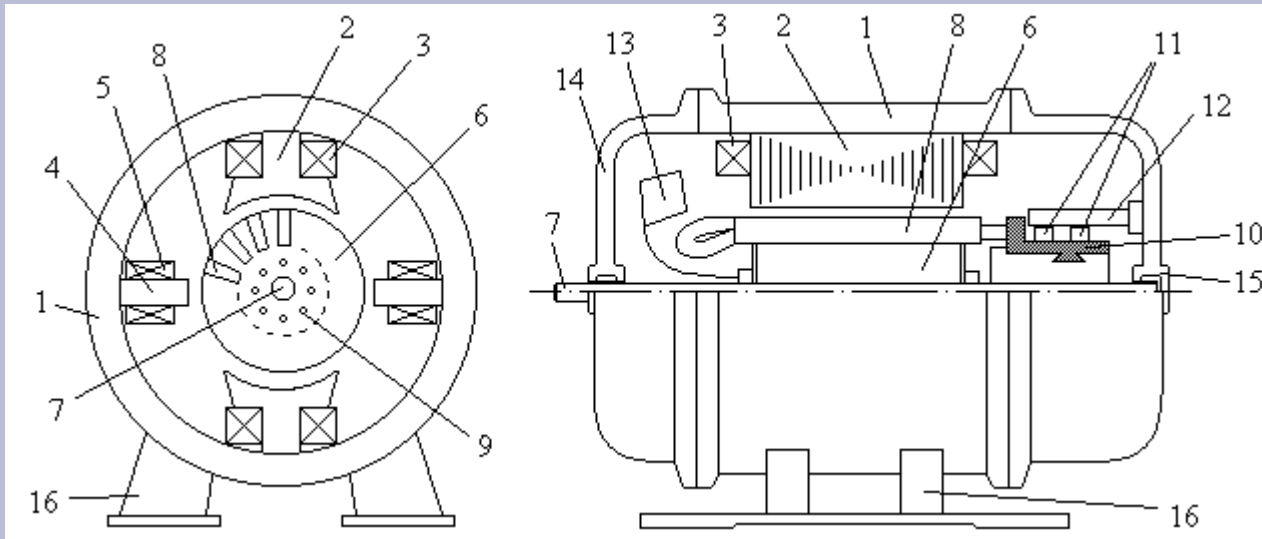
В електричній машині постійного струму нерухома магнітна система утворює незмінний у просторі магнітний потік. Провідники зі струмом, розташовані на обертовій частині електричної машини постійного струму (якорі), знаходяться у силевій взаємодії з цим магнітним потоком. Відповідно до правила лівої руки утворюється електромагнітний момент  $M_{EM}$ , який у режимі двигуна співпадає з напрямом обертання якоря  $n_d$ , а в режимі генератора протидіє його обертанню  $n_r$ , яке забезпечується зовнішнім механічним приводом. Для забезпечення нормальної роботи електричної машини постійного струму необхідно, щоб напрям струму в провідниках обмотки якоря змінювався на протилежний при потраплянні їх під іншу полярність магнітної системи.

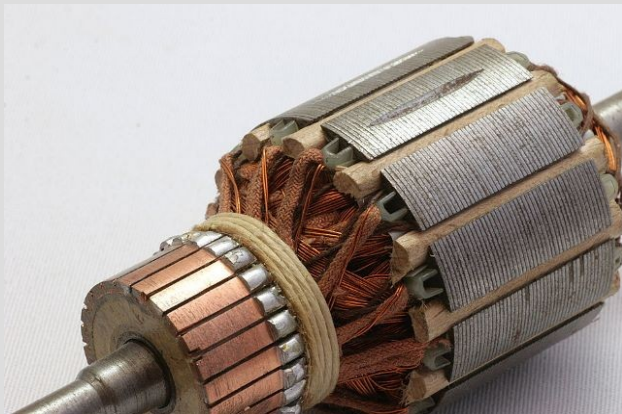
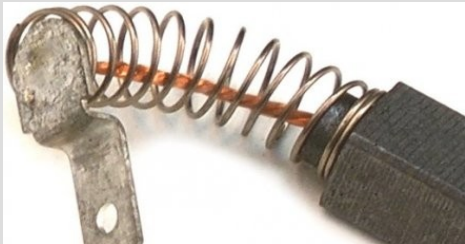
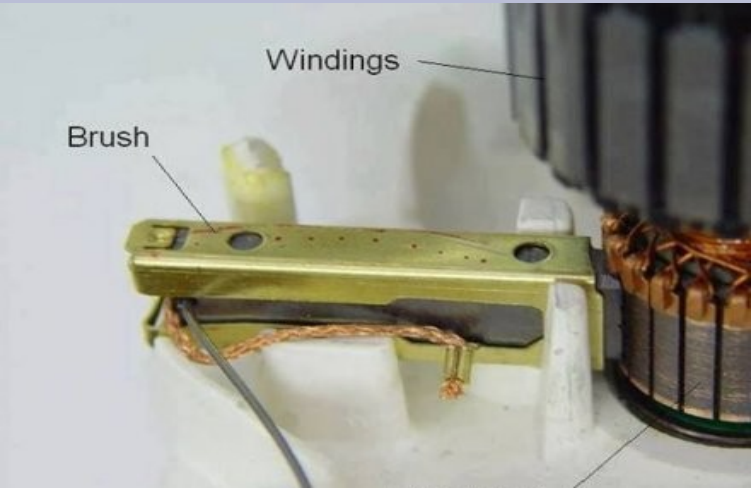
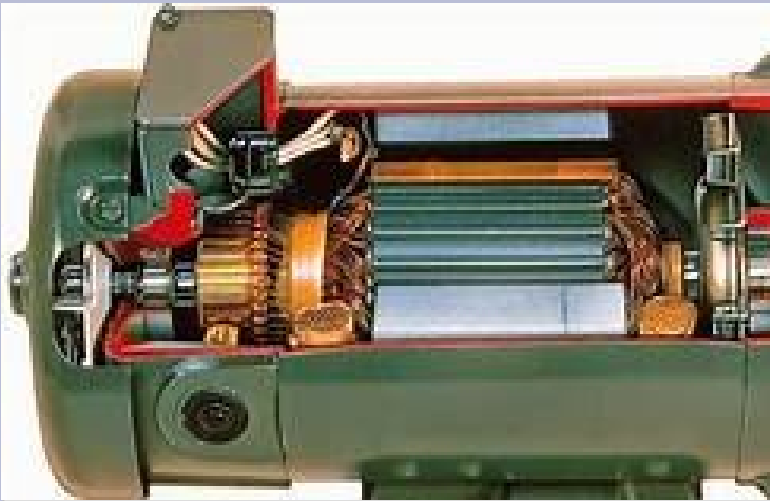


В електричній машині змінного струму просторовий напрям магнітного поля змінюється з періодичністю зміни струму в обмотці нерухомого статора. Обертання ротора забезпечується тим, що напрям струму в провідниках його обмотки не змінюється й завжди відповідає полярності магнітного потоку, що змінюється. Таким чином, як і в електричній машині постійного струму, забезпечується незмінна силова взаємодія магнітного поля статора зі струмом у роторі, а щодо напрямку його обертання, то воно визначається теж як в електричній машині постійного струму.



# ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ





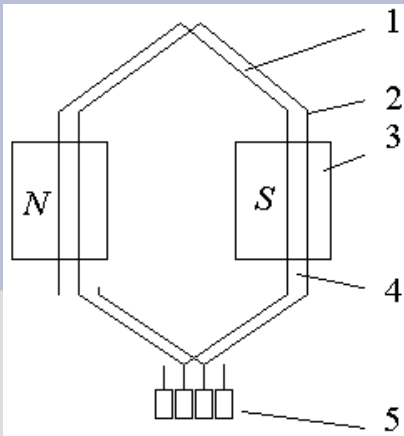
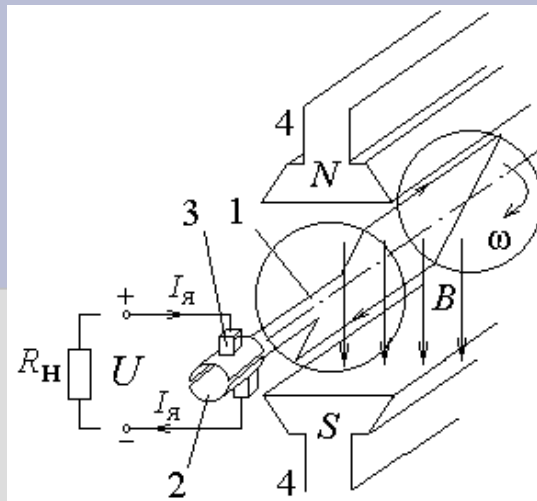
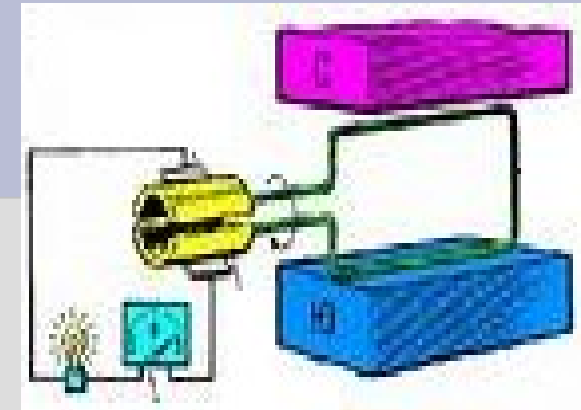


Схема обмотки якоря: 1 – лобова частина обмотки; 2 – секція обмотки; 3 – головний полюс; 4 – пазова частина обмотки; 5 колектор



Принципова схема (а) та форма ЕРС (б) машин постійного струму



## ЕРС, рівняння електричного стану та способи збудження машин постійного струму

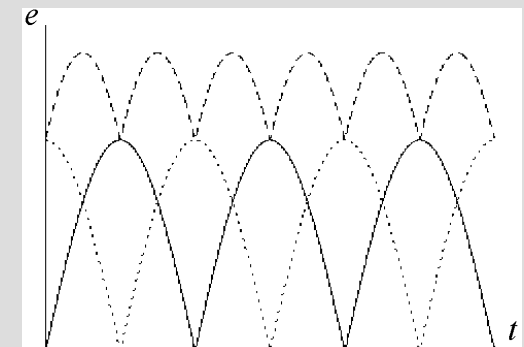
$$e = B_{cp} l_a v \quad \tau = \frac{\pi \cdot D_{я}}{2p} \quad v = \frac{\pi D_{я} n}{60} \quad E = \sum_{i=1}^{N/2a} e_i = l_a v \sum_{i=1}^{N/2a} B_{cp_i} = \frac{N}{2a} l_a v \cdot B_{cp}$$

$$\Phi = B_{cp} S = B_{cp} \tau \cdot l_a = B_{cp} l_a \frac{\pi D_{я}}{2p}$$

$$E = \frac{N}{2a} l_a v B_{cp} = \frac{N}{2a} l_a B_{cp} \frac{\pi D_{я} n}{60} \cdot \frac{2p}{2p} = \frac{N}{2a} l_a B_{cp} \tau \cdot n \frac{2p}{60} = \frac{p}{a} \frac{N}{60} \Phi \cdot n \quad E = c_E \Phi \cdot n$$

Для генератора:  $U = E - I_a R_{я}$

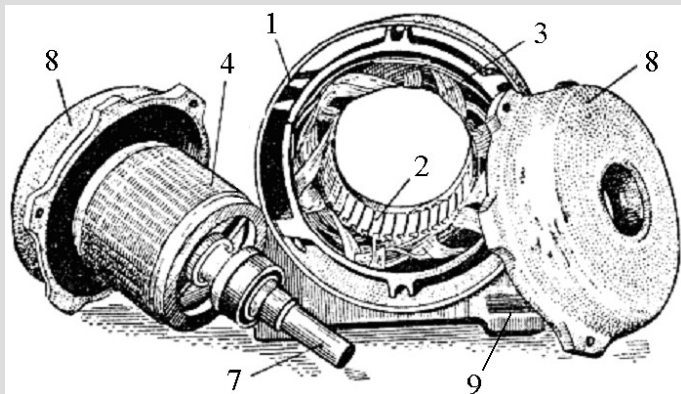
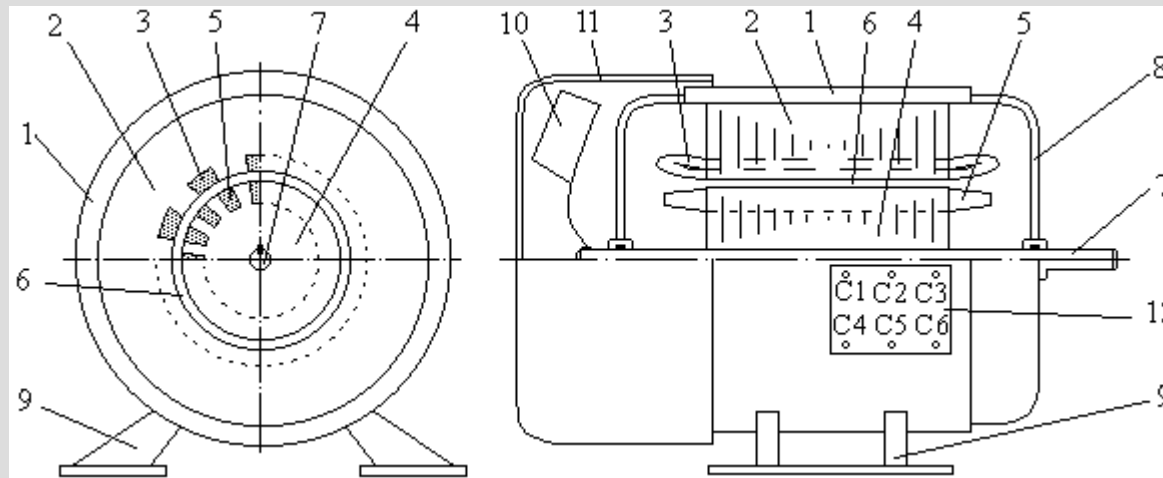
Для двигуна:  $U = E + I_a R_{я}$



# ТРИФАЗНІ АСИНХРОНІ ДВИГУНИ

До асинхронних відносять машини змінного струму, частота обертання ротора  $n_2$  яких при постійній частоті змінного струму джерела  $f$  змінюється зі змінюванням навантаження і відрізняється від синхронної частоти, тобто від частоти обертання магнітного поля статора  $n_1$ . «Асинхронний» – *неодночасний*.

## Будова асинхронного двигуна



трифазний  
асинхронний двигун з  
короткозамкненим  
ротором серія АІР

## Принцип дії асинхронного двигуна

Для утворення обертового магнітного поля необхідні дві умови.  
 Це *просторовий зсув* між обмотками (фазами), які утворюють магнітне поле, та *фазовий (часовий) зсув* між цими обмотками

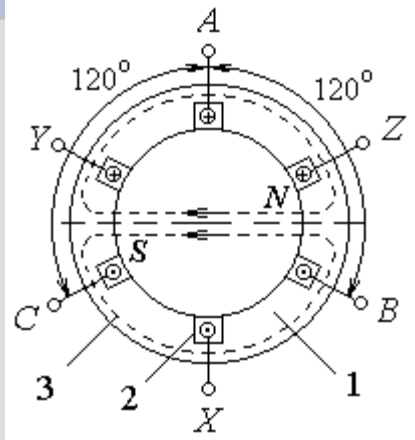


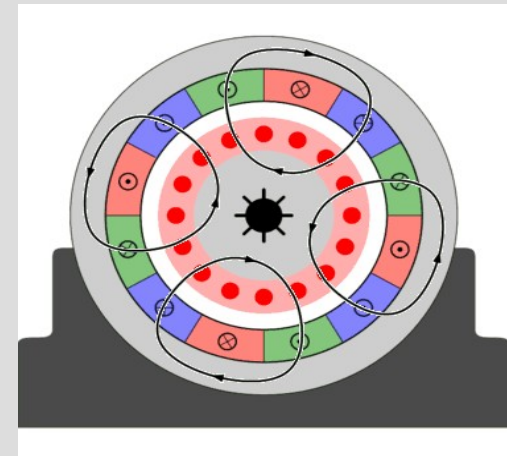
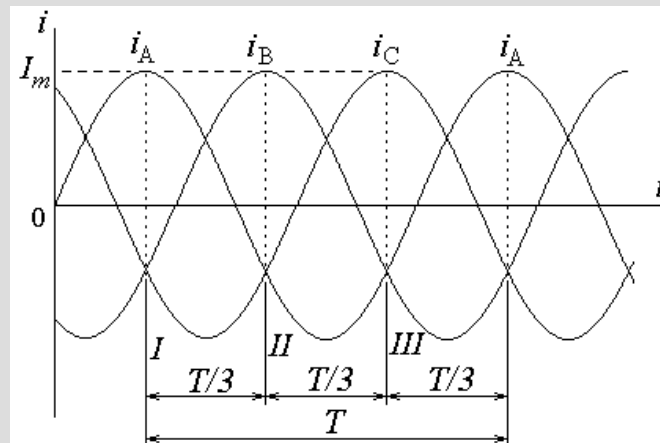
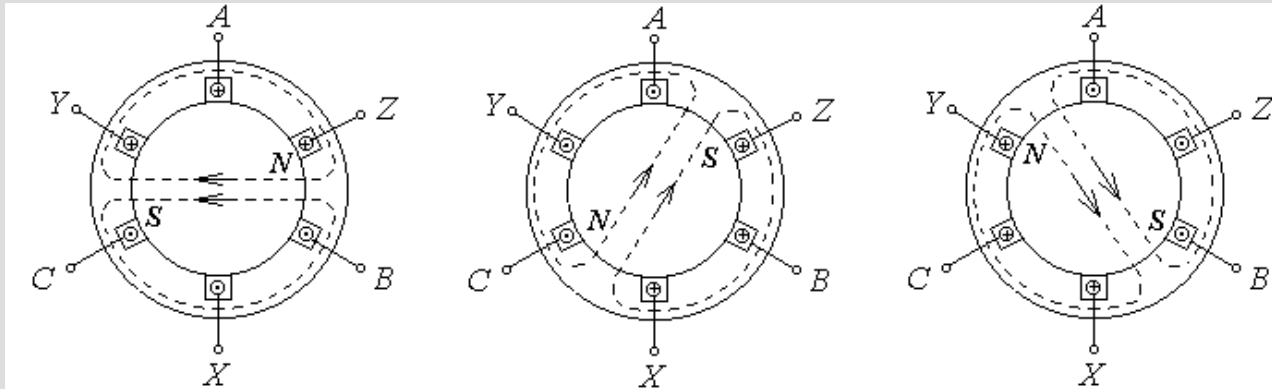
Схема статора двигуна:  
 1 – осердя; 2 – пази з обмоткою; 3 – магнітне поле

$$i_A = I_m \sin \omega t \quad B_A = B_m \sin \omega t$$

$$i_B = I_m \sin(\omega t - 120^\circ) \quad B_B = B_m \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$i_C = I_m \sin(\omega t + 120^\circ) \quad B_C = B_m \sin(\omega t + 120^\circ)$$

$$n_1 = \frac{60 \cdot f}{p}$$



## Параметри асинхронного двигуна

КОВЗАННЯ  $s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$

$s_{НОМ} = 2...7 \%$

$n_1 = \frac{60 \cdot f}{p}$

$E_1 = 4,44 \cdot f_1 \Phi_m w_1 k_{обм1}$

$E_2 = 4,44 \cdot f_2 \Phi_m w_2 k_{обм2}$      $n_1 - n_2 = \frac{60 \cdot f_2}{p}$      $f_2 = \frac{(n_1 - n_2) \cdot p}{60} \cdot \frac{n_1}{n_1} = \frac{p \cdot n_1}{60} \cdot \frac{n_1 - n_2}{n_1} = f_1 \cdot s$      $f_2 = f_1 \cdot s$

$E_2 = 4,44 \cdot f_2 \Phi_m w_2 k_{обм2} = 4,44 \cdot f_1 s \cdot \Phi_m w_2 k_{обм2} = E_{20} s$      $E_2 = E_{20} s$      $E_{20} = 4,44 \cdot f_1 \cdot \Phi_m w_2 k_{обм2}$  - ЕРС нерухомого ротора

$X_2 = \omega_2 L_2 = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi f_1 s L_2 = X_{20} s$      $X_2 = X_{20} s$      $X_{20} = 2\pi f_1 L_2$  - індуктивний опір нерухомого ротора (s=1)

## Рівняння електричного стану кіл статора і ротора

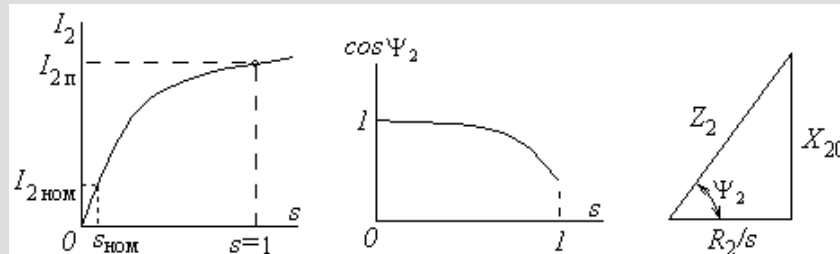
$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 \underline{Z}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 (R_1 + jX_1)$

$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - \underline{I}_2 \underline{Z}_2 = \underline{E}_2 - R_2 \underline{I}_2 - jX_2 \underline{I}_2$      $\underline{U}_2 = 0$      $\underline{E}_2 = \underline{I}_2 \underline{Z}_2 = \underline{I}_2 R_2 + j \underline{I}_2 X_2$      $E_{20} s = \underline{I}_2 R_2 + j \underline{I}_2 X_{20} s$

$\underline{E}_{20} = \underline{I}_2 \frac{R_2}{s} + j \underline{I}_2 X_{20} = \underline{I}_2 \left( \frac{R_2}{s} + j X_{20} \right) = \underline{I}_2 \underline{Z}_2$      $\underline{Z}_2 = \frac{R_2}{s} + j X_{20}$

$\underline{I}_2 = \frac{E_{20}}{\frac{R_2}{s} + j X_{20}}$      $I_2 = \frac{E_{20}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{20}^2}}$

$\cos \Psi_2 = \frac{R_2/s}{Z_2} = \frac{R_2/s}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{20}^2}}$



# МОМЕН ТА МЕХАНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

$$M_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_1} \quad \omega_1 = 2\pi f_1 = 2\pi \frac{n_1 p}{60}$$

$$P_{em} = E_{20} I_2 \cos \Psi_2$$

$$M_{em} = \frac{4,44 w_2 f_1 \Phi_m k_{обм2}}{2\pi n_1 p} I_2 \cos \Psi_2 = C'_M \Phi_m I_2 \cos \Psi_2$$

$$M_{em} = C'_M \Phi_m I_2 \cos \Psi_2$$

$$C'_M = \frac{4,44 w_2 f_1 \Phi_m k_{обм2}}{2\pi n_1 p} \cdot 60$$

$$\cos \Psi_2 = \frac{R_2/s}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{20}^2}}$$

$$\Phi_m = \frac{E_1}{4,44 w_1 f_1 k_{обм1}} \approx \frac{U_1}{4,44 w_1 f_1 k_{обм1}}$$

$$I_2 = \frac{E_{20}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{20}^2}}$$

$$E_{20} = 4,44 w_2 f_1 \Phi_m k_{обм2}$$

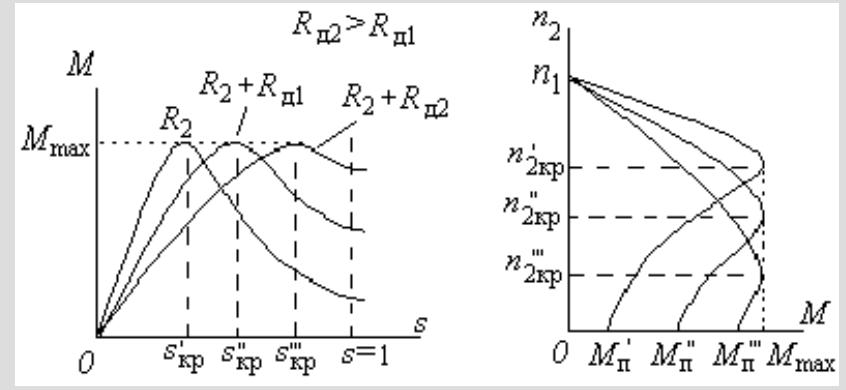
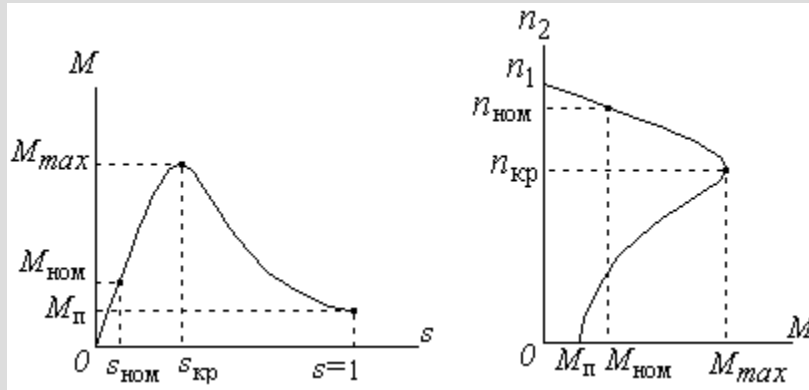
$$E_{20} = \frac{w_2 k_{обм2}}{w_1 k_{обм1}} E_1 \quad E_1 \approx U_1$$

$$I_2 \approx \frac{w_2 k_{обм2}}{w_1 k_{обм1}} \frac{U_1}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{20}^2}}$$

$$M = C'_M U_1^2 \frac{R_2/s}{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{20}^2}$$

$$E_1 = 4,44 w_1 f_1 \Phi_m k_{обм1}$$

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad n_2 = n_1 (1 - s)$$



## Способи пуску асинхронних двигунів

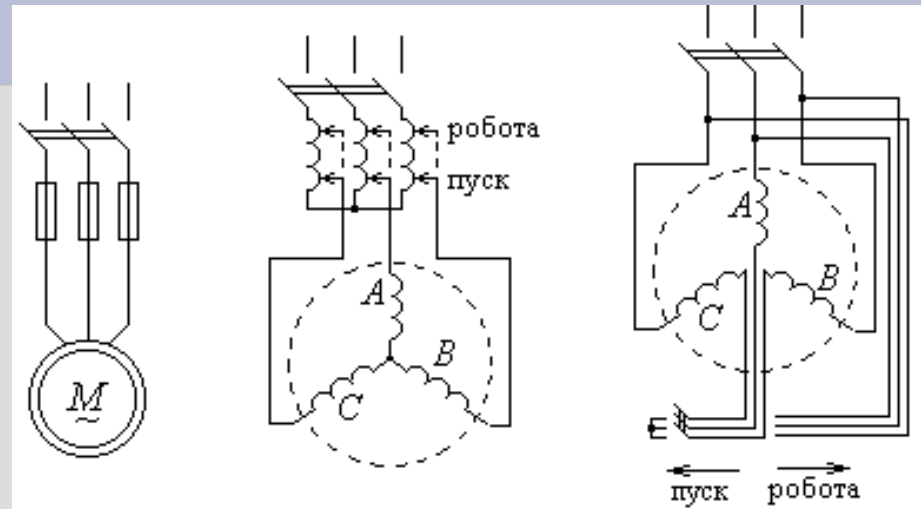
малий пусковий момент  $M_{\text{п}}$ ;

великий пусковий струм  $I_{\text{п}}$

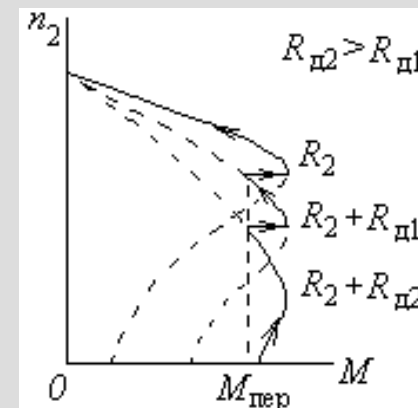
### Прямий пуск

Пуск при понижений напрузі:

- автотрансформаторной спосіб пуску
- переключення обмотки статора з зірки на трикутник



Пуск асинхронного двигуна з фазним ротором



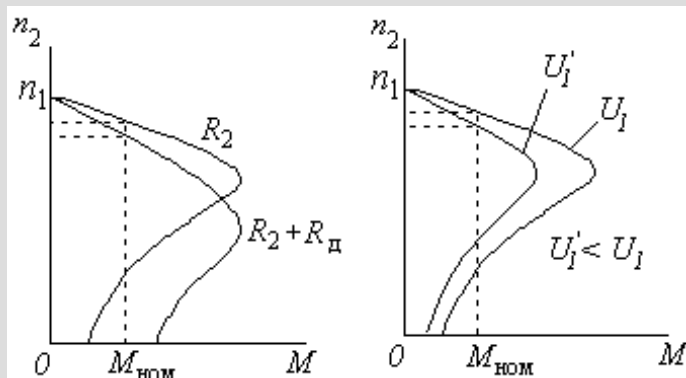
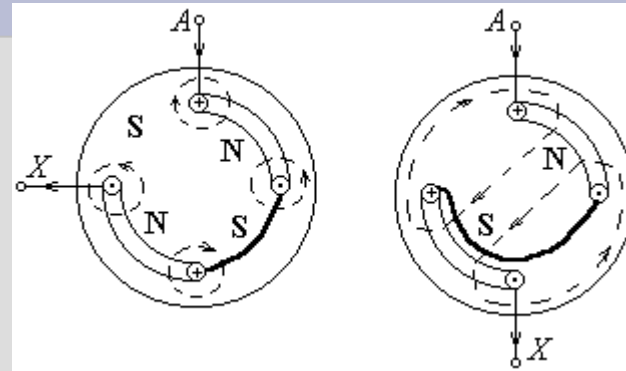
# Реверсування та регулювання частоти обертання асинхронних двигунів

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} \quad n_2 = n_1(1 - s) = \frac{60 \cdot f_1}{p}(1 - s)$$

Частотне регулювання

Полюсне регулювання

Роторне регулювання



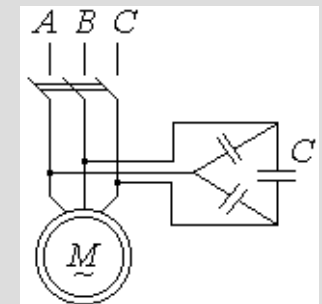
## Гальмівні режими асинхронного двигуна

Гальмування через противключення

Генераторне гальмування

Динамічне гальмування

Конденсаторне гальмування



## Однофазні асинхронні двигуни

Однофазний асинхронний двигун складається зі статора з однофазною робочою обмоткою

Змінний струм, проходячи по однофазній обмотці статора, утворює пульсуюче магнітне поле

$$B(\alpha, t) = B_m \cos \alpha \cdot \sin \omega t$$

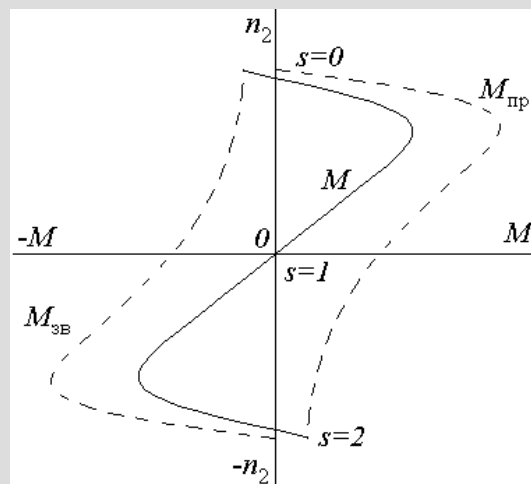
$\alpha$  – просторова координата індукції магнітного потоку вздовж окружності по внутрішньому діаметру статора

$$B(\alpha, t) = B_m \cos \alpha \cdot \sin \omega t = \frac{1}{2} B_m \sin(\omega t - \alpha) + \frac{1}{2} B_m \sin(\omega t + \alpha) = B_{\text{пр}} + B_{\text{зв}}$$

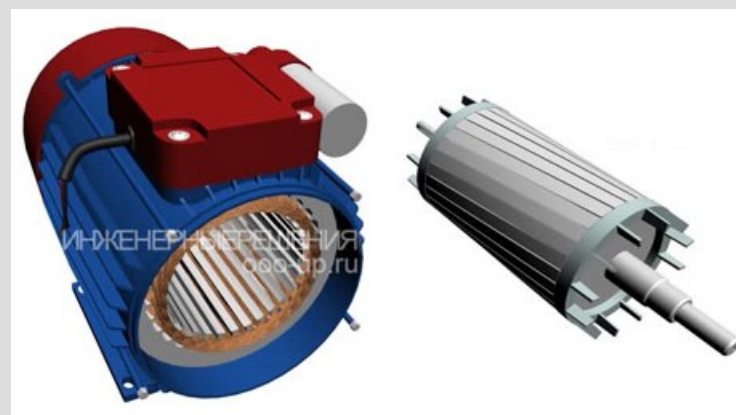
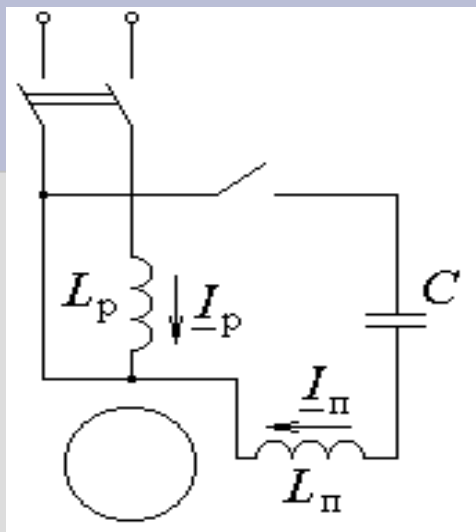
де  $B_{\text{пр}}$  і  $B_{\text{зв}}$  – відповідно індукції прямого і зворотного магнітного поля

$$M(n) = M_{\text{пр}}(n) - M_{\text{зв}}(n)$$

Механічна характеристика однофазного асинхронного двигуна

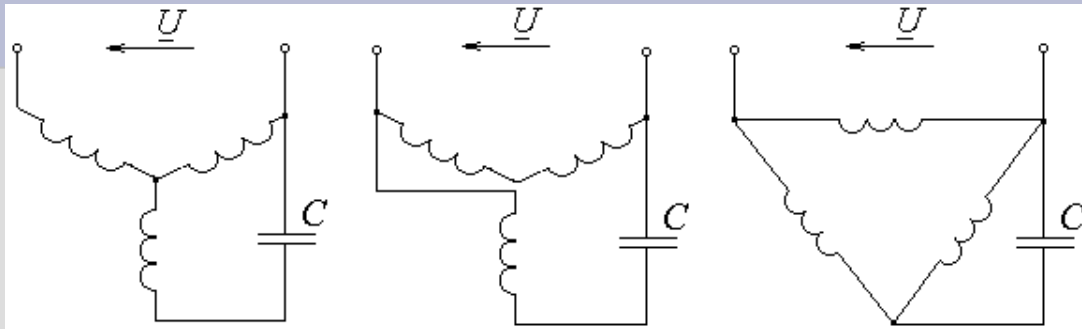


## Однофазный асинхронный двигатель с пусковой обмоткой

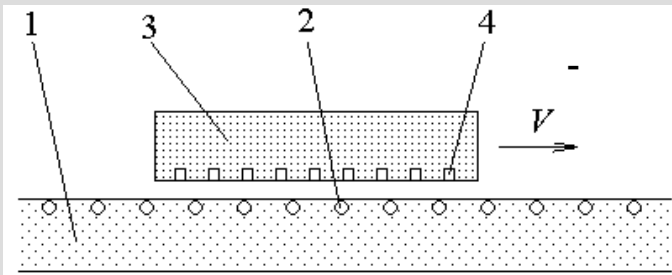


Конденсаторный асинхронный двигатель

## Схеми з'єднання статорних обмоток трифазного асинхронного двигуна при підключенні до однофазної мережі



### Лінійні асинхронні двигуни



сталеве осердя 1, в якому укладена трифазна обмотка 2, і бігуна, який складається з осердя 3 з короткозамкненою обмоткою 4 типа «біляча клітка»

$V_1 = 2\pi \cdot f_1$     Лінійна швидкість магнітного поля статора

$s = \frac{V_1 - V_2}{V_1}$     - Ковзання



Вторинний елемент — нерухома алюмінієва стрічка

***Thanks for your attention***