

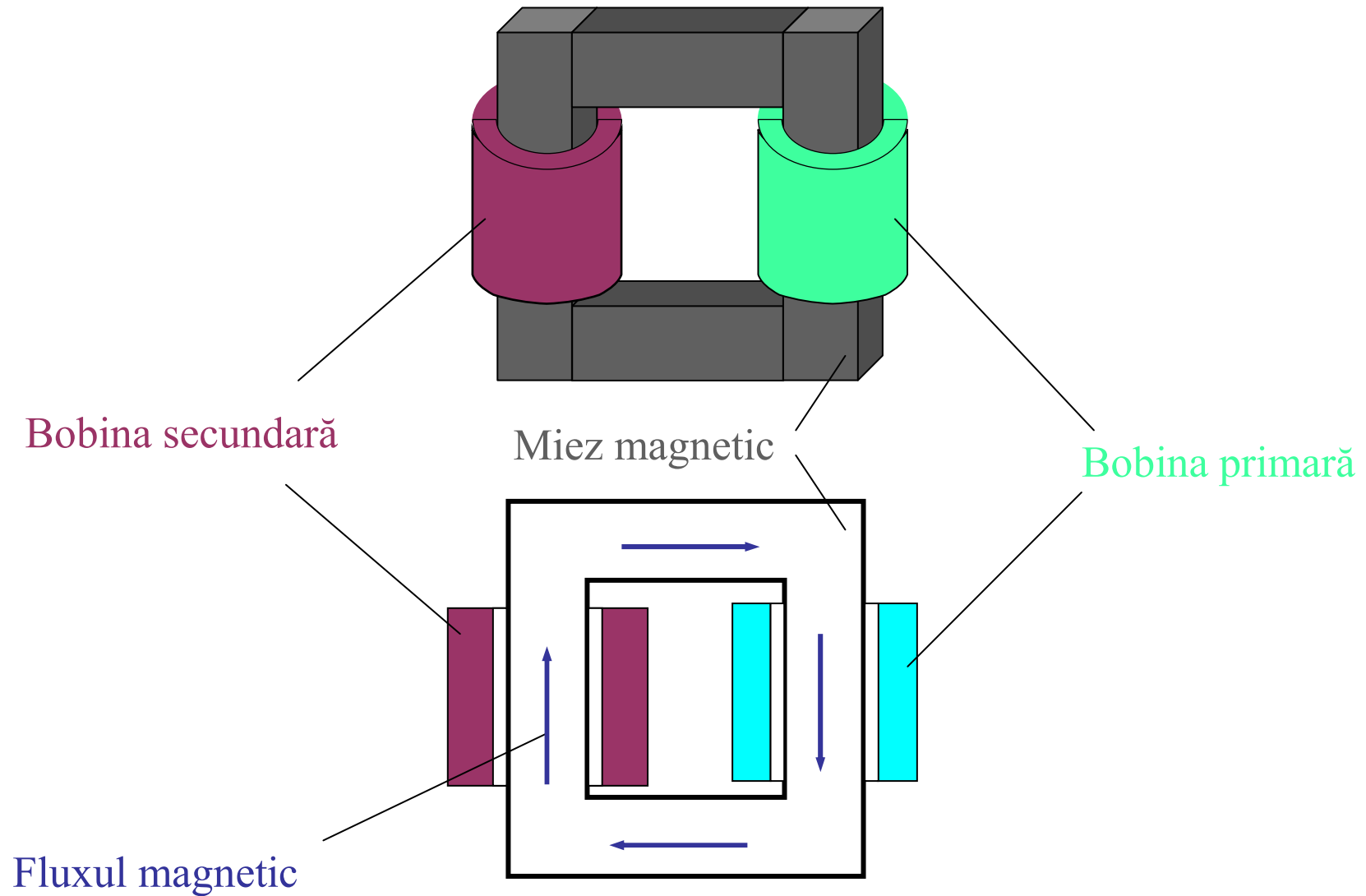
---

# TEORIA TEHNICA A TRANSFORMATORULUI

---

Transformator monofazat

# Principiul de construcție al transformatorului monofazat



## Principiul de funcționare

Nu există piese în mișcare

$$\omega = 0$$

Există două înfășurări.

Înfășurarea primară este alimentată de la o tensiune de frecvență  $f_1$

Curentul din primar produce o solenație, care în circuitul magnetic închis al transformatorului determină un flux magnetic variabil în timp.

Fluxul magnetic, variabil în timp cu frecvența curentului din primar, induce în înfășurările transformatorului t.e.m. de aceeași frecvență, având valori proporționale cu numerele de spire ale înfășurărilor.

Dacă la bornele secundarului se conectează o sarcină ( un consumator) ia naștere un curent de sarcină de frecvență  $f_2$  egală cu frecvența curentului din primar.

Condiția de frecvență  $f_1 = f_2$  este îndeplinită, deci are loc transformarea energiei electrice, având parametrii  $U_1$  și  $I_1$ , în energie electrică cu parametrii  $U_2$  și  $I_2$ .

# Modelarea transformatorului

Tipuri de modele:

**Model circuit;** fiecare element funcțional se reduce la un circuit electric, cel mai utilizat model

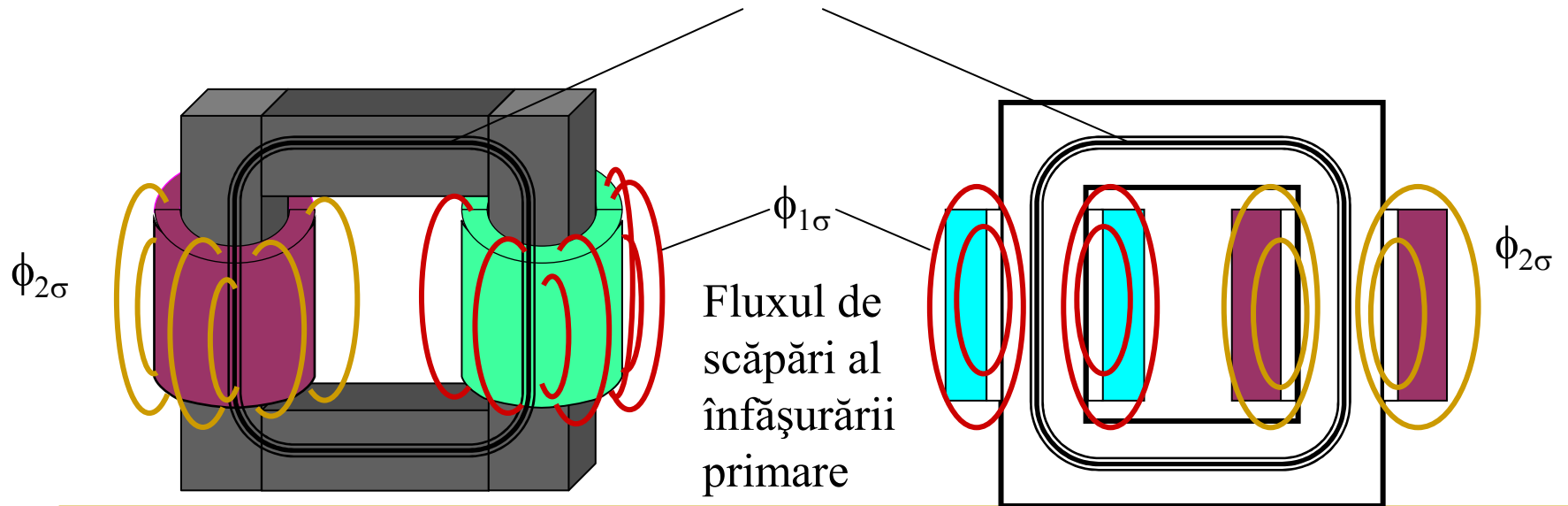
**Model câmp;** trebuie cunoscute dimensiunile geometrice, Se calculează câmpurile magnetice, t.e.m., curenții

**Model mixt circuit câmp;** este necesară cunoașterea dimensiunilor miezului pentru calcul da câmp, înfășurările Sunt înlocuite cu circuite electrice

Modelul de circuit

Flux fascicular  $\phi_m$

• Teoria tehnică



# Fluxul de magnetizare si de scapari

## Modelul de circuit

- Teoria fizică cunoscută de la Electrotehnică
- Teoria tehnică

Fluxul total:

$$\Psi_{\lambda} = \Psi_{\lambda\sigma} + w_{\lambda} \cdot k_{b\lambda} \cdot \Phi_m$$

Fluxul de scăpări:

$$\Psi_{\lambda\sigma} = L_{\lambda\sigma} \cdot i_{\lambda}$$

Fluxul de magnetizare al înfășurării

$$\Psi_{\lambda m} = w_{\lambda ef} \cdot \Phi_m$$

Numărul de spire efective la înfășurări concentrate

$$w_{\lambda ef} = w_{\lambda} \cdot k_{b\lambda} = w_{\lambda} \quad \text{Factor de bobinaj unitar !}$$

---

# Teoria tehnică a transformatorului

## Avantajele teoriei tehnice:

- fluxul de magnetizare este fluxul din miez,
- nu apar elemente de circuit negative,
- se poate considera saturația,
- se încadrează în teoria unitară a mașinilor electrice.

Fiecare element funcțional se reduce la un circuit electric, având parametrii: rezistențe și inductivități.

Înfășurările se reduc la circuite electrice, având parametrii;  
 $R_1$  ,  $L_{\sigma 1}$  respectiv  $R_2$  ,  $L_{\sigma 2}$  .

Circuitul magnetic se înlocuiește cu rezistența și inductivitatea de magnetizare

---

# T.e.m. indusă în înfășurări

## Modelarea înfășurărilor

✓ tensiunea electromotoare indusă :

t.e.m. totală :

$$e_{\lambda t} = -\frac{d\Psi_{\lambda}}{dt} = -\frac{d\Psi_{\lambda\sigma}}{dt} - w_{\lambda} \cdot \frac{d\Phi_m}{dt}$$

t.e.m. indusă de fluxul de scăpări

$$\frac{d\Psi_{\lambda\sigma}}{dt} = L_{\lambda\sigma} \cdot \frac{di_{\lambda}}{dt}$$

t.e.m. indusă de fluxul util, de fluxul de magnetizare

$$e_{\lambda} = -w_{\lambda} \cdot \frac{d\Phi_m}{dt}$$

## Ecuatii de tensiuni

- ✓ ecuații de tensiuni: asocierea sensurilor pozitive

receptor :  $\cdot i = e + u$

generator:  $\cdot i = e - u$

- ✓ ecuații de tensiuni pentru transformator monofazat:

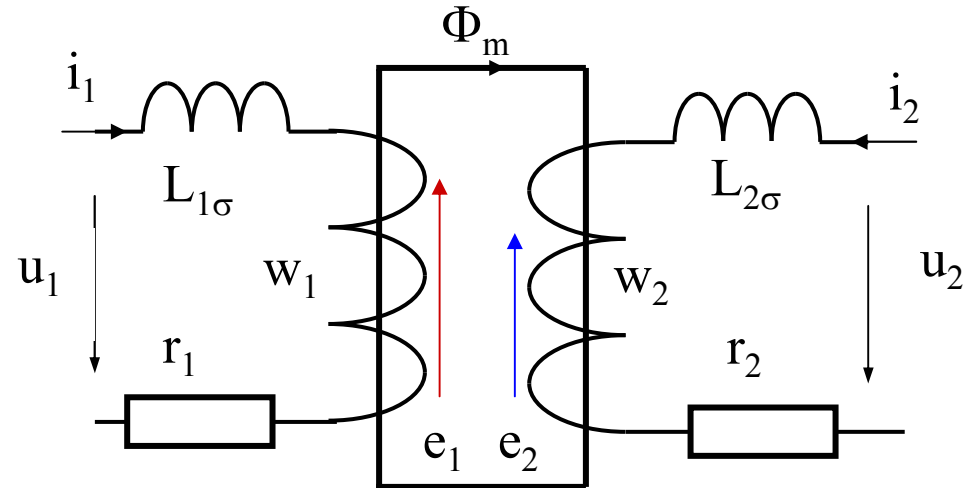
$$u_1 = r_1 \cdot i_1 + L_{1\sigma} \frac{di_1}{dt} + w_1 \frac{d\Phi_m}{dt} \quad \text{receptor}$$

$$u_2 = r_2 \cdot i_2 + L_{2\sigma} \frac{di_2}{dt} + w_2 \frac{d\Phi_m}{dt} \quad \text{receptor}$$

- ✓ ecuația sarcinii:  $-u_s = r_s \cdot i_2 + L_s \cdot \frac{di_2}{dt} + \frac{1}{C_s} \int i_2 \cdot dt$  generator



## Schema echivalenta transformator ideal



$$u_1 = r_1 \cdot i_1 + L_{1\sigma} \frac{di_1}{dt} + w_1 \frac{d\Phi_m}{dt} \qquad u_2 = r_2 \cdot i_2 + L_{2\sigma} \frac{di_2}{dt} + w_2 \frac{d\Phi_m}{dt}$$

Fluxul de magnetizare produs de curenții din înfășurările transformatorului

$$\Phi_m = \Lambda \cdot (w_1 \cdot i_1 + w_2 \cdot i_2)$$

## Reducerea circuitului magnetic la un circuit electric

-legea lui Ohm

$$\Phi_m = \frac{F}{\mathfrak{R}} = \Lambda \cdot F$$

- Solenatia ( F), ipoteze:

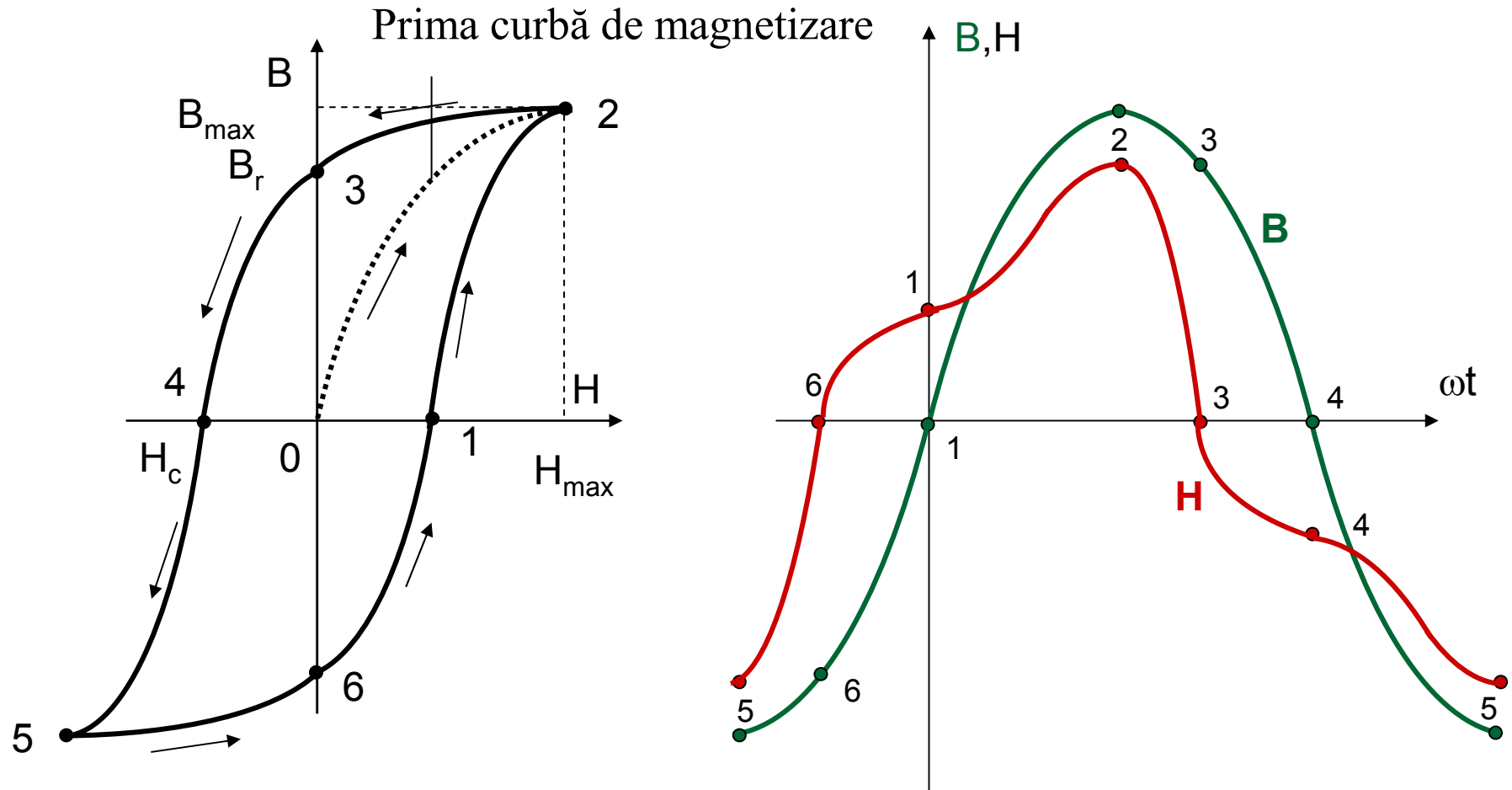
- înfășurări bobinate în același sens,
- curenți magnetizează în același sens.
- Factor de bobinaj unitar ,
- înfășurări concentrice.

$$k_{b\lambda} = 1$$

$$F = w_1 \cdot i_1 + w_2 \cdot i_2$$

- circuitul magnetic real
- curba de magnetizare reala cu bucla de histerezis

# Legătura dintre B și H

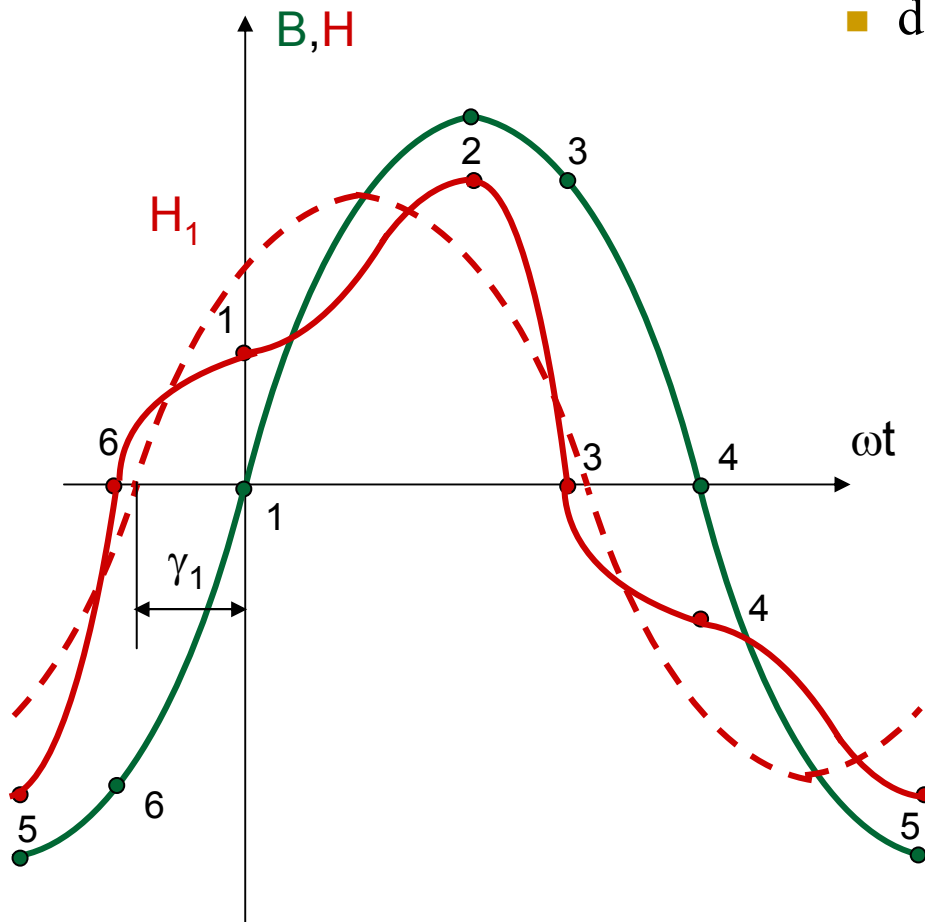


Ciclul de histereză

# Curba de magnetizare

Consecințe :

- dependența neliniară,
- dependență neunivocă,
  - nu variază la fel în timp,  
 $\Phi_m(B)$  sinusoidal,  
 $F(H)$  nesinusoidal.
- Există defazaj dintre  $B$  și  $H$
- Există pierderi în fier.



## Curentul de magnetizare

solenția rezultantă:  $F = w_1 \cdot i_1 + w_2 \cdot i_2$

Se poate defini un **curent de magnetizare** din înfășurare care produce solenția rezultantă:

$$F = w_1 \cdot i_{\mu 1} = w_2 \cdot i_{\mu 2}$$

Curentul de magnetizare:

În primar:

$$i_{\mu 1} = i_1 + i_2 \frac{w_2}{w_1}$$

În secundar:

$$i_{\mu 2} = \frac{w_1}{w_2} i_1 + i_2$$

**raport de transformare pe fază:**

$$k = \frac{w_1}{w_2}$$

## Reducerea circuitului magnetic la un circuit electric

- ✓ inductivitate de magnetizare:

Dinspre primar

$$L_{\mu 1} = \frac{\Psi_{m1}}{i_{\mu 1}} = \frac{w_1 \cdot \Phi_m}{i_{\mu 1}} = w_1^2 \cdot \Lambda$$

Dinspre secundar

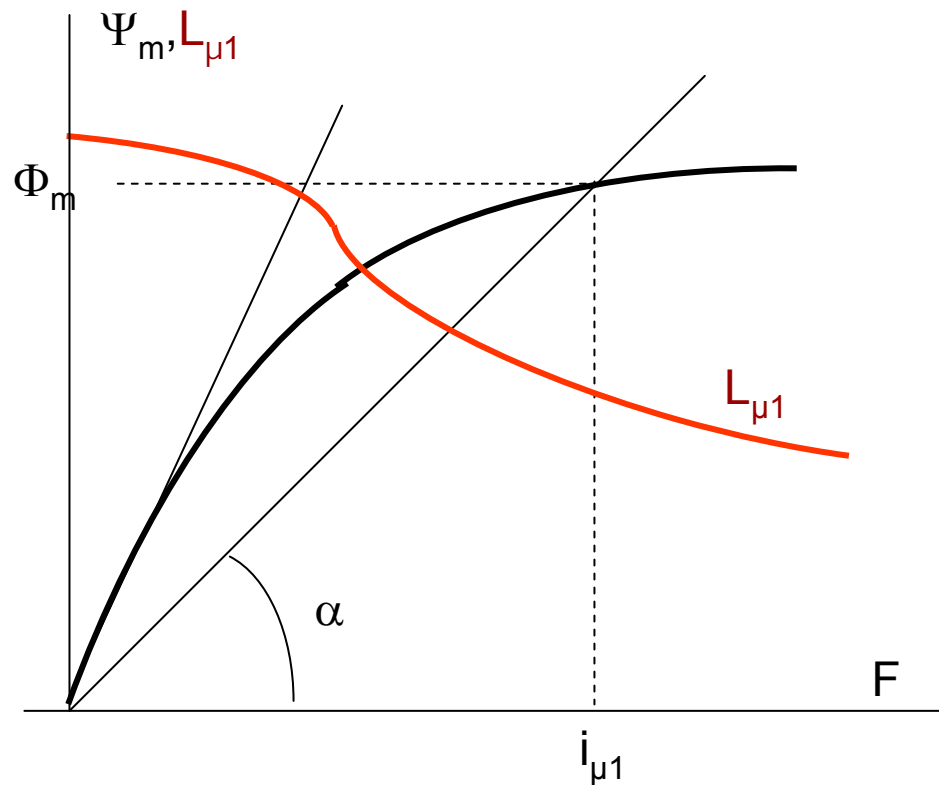
$$L_{\mu 2} = \frac{\Psi_{m2}}{i_{\mu 2}} = w_2^2 \cdot \Lambda = \frac{L_{\mu 1}}{k^2}$$

sau

$$L_{\mu} = w_1 \cdot w_2 \cdot \Lambda = \frac{L_{\mu 1}}{k} = L_{\mu 2} \cdot k$$

## Influența curbei de magnetizare

$$\Psi_{m1} = w_1 \cdot \Phi_m = w_1 \cdot \Lambda \cdot F$$



□ inductivitatea de magnetizare

$$L_{\mu 1} = \frac{\Psi_{m1}}{i_{\mu 1}} = \operatorname{tg} \alpha$$

$$L_{\mu 1} = w_1 \frac{\Phi_m}{i_{\mu 1}}$$

## Influența curbei de magnetizare

- pierderi în fier.

Se consideră egale cu pierderi într-o rezistență  $r_w$ ,  
parcurs de curentul  $i_w$ .

Dinspre primar :

$$P_{Fe} = r_{w1} \cdot i_{w1}^2$$

$$r_{w1} \cdot \dot{i}_{w1} = -e_1$$

Dinspre secundar:

$$P_{Fe} = r_{w2} \cdot i_{w2}^2$$

$$r_{w2} \cdot \dot{i}_{w2} = -e_2$$

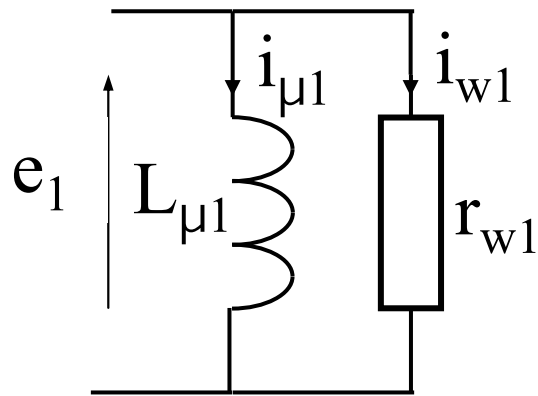
$e_\lambda$  este t.e.m. Îndusă de fluxul util, fascicular



## Schema echivalentă a circuitului magnetic real

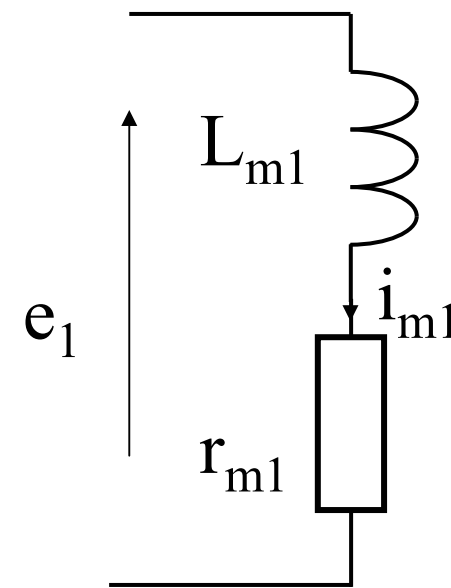
Dinspre primar :

$$e_1 = -w_1 \cdot \frac{d\Phi_m}{dt} = -L_{\mu 1} \cdot \frac{di_{\mu 1}}{dt}$$



$$r_{w1} \cdot i_{w1} = -e_1$$

$$e_1 = -r_{1m} \cdot i_{m1} - L_{m1} \cdot \frac{di_{m1}}{dt}$$



$$i_{m1} = i_{\mu 1} + i_{w1}$$

---

## Raportarea înfășurărilor

Necesitatea : legarea celor două circuite distingte.

✓ **raportarea înfășurărilor**: operația de înlocuire a unei înfășurări cu alta care îndeplinește următoarele condiții:

- același număr de spire,
- aceeași putere
- aceleași pierderi,
- constante de timp identice.

**Rezultat** : un transformator la care **cele două înfășurări au același număr de spire**, deci t.e.m. induse de fluxul util sunt egale.

**Raportare la primar** : se înlocuiește secundarul

---

## Relatii de raportare.

$$w_2 \longrightarrow w_1 \quad \Rightarrow$$

t.e.m. egale

$$1 \quad e_2' = w_1 \frac{e_2}{w_2} = k \cdot e_2 = e_1$$

Puteri egale

$$2 \quad e_2 \cdot i_2 = e_2' \cdot i_2' \quad \Rightarrow \quad i_2' = \frac{i_2}{k}$$

Pierderi egale

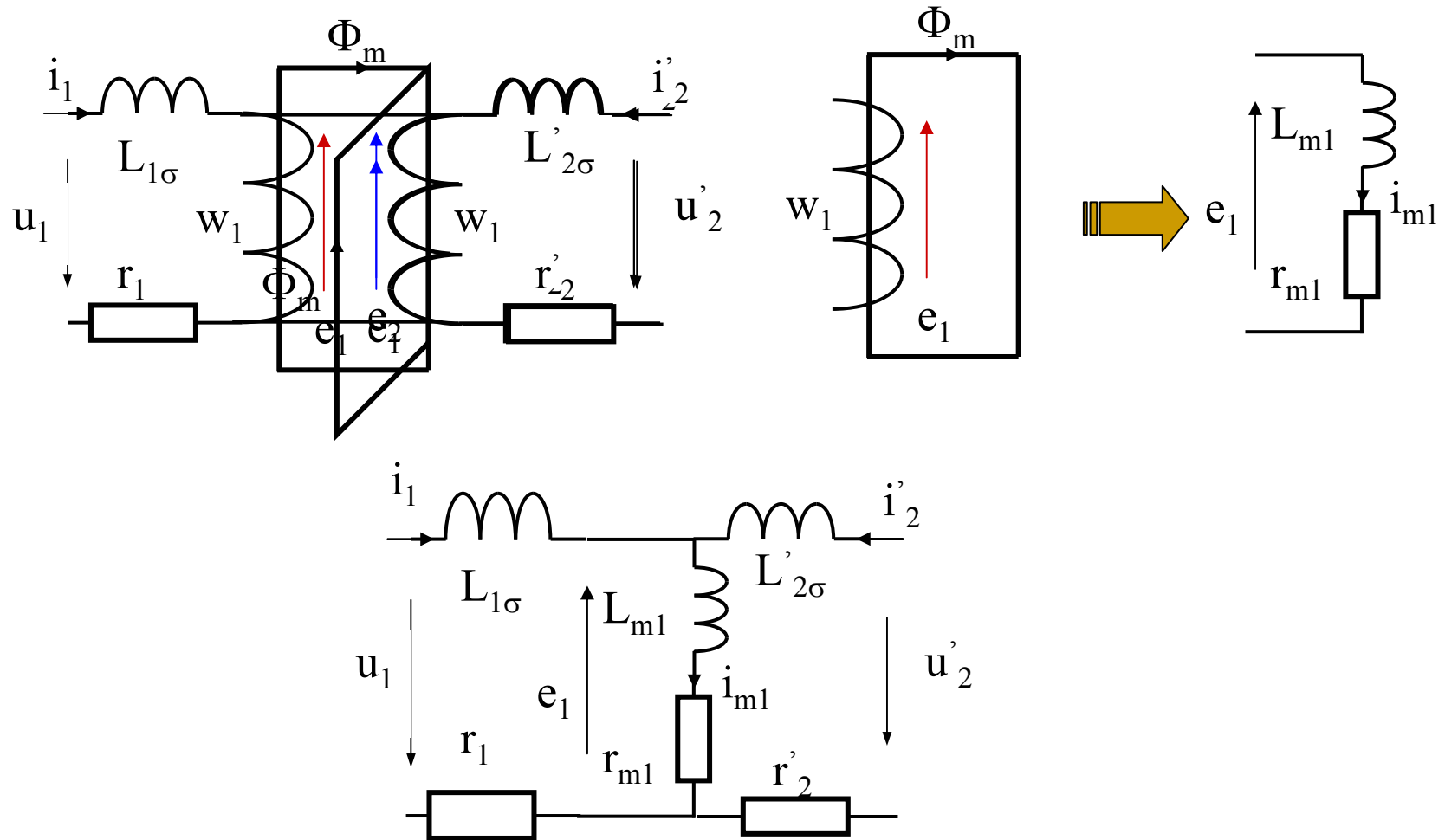
$$3 \quad r_2 \cdot i_2^2 = r_2' \cdot i_2'^2 \quad \Rightarrow \quad r_2' = r_2 \cdot k^2$$

Constante de timp egale

$$4 \quad \frac{L_{2\sigma}}{r_2} = \frac{L_{2\sigma}'}{r_2'} \quad \Rightarrow \quad L_{2\sigma}' = L_{2\sigma} \cdot k^2$$

---

# Schema echivalentă a transformatorului raportat



# Funcționarea transformatorului în regim sinusoidal

## Ecuatii în regim sinusoidal

- se mențin notațiile utilizate pentru parametrii
- se noteaza cu litere mari mărimile electrice și magnetice care variază sinusoidal- vectori de timpi
- se notează reactanța cu X, impedanța cu Z

$$\underline{U}_1 = \underline{Z}_1 \cdot \underline{I}_1 - \underline{E}_1$$

$$\underline{E}_1 = -\underline{Z}_{m1} \cdot \underline{I}_{m1}$$

$$\underline{U}'_2 = \underline{Z}'_2 \cdot \underline{I}'_2 - \underline{E}'_2$$

$$\underline{I}_{m1} = \underline{I}_1 + \underline{I}'_2$$

✓ raportarea sarcinii la primar:

$$R'_s = R_s \cdot k^2 \quad \text{si} \quad X'_s = X_s \cdot k^2$$

$$-\underline{U}'_2 = R'_s \cdot \underline{I}'_2 + j \cdot X'_s \cdot \underline{I}'_2$$

## Schemele echivalente în regim sinusoidal

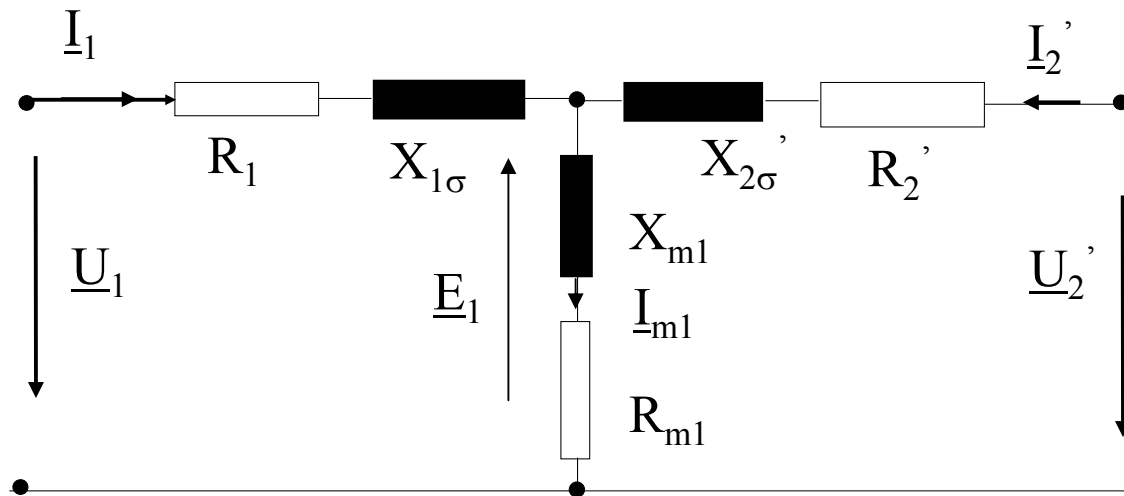
✓ schema echivalentă a transformatorului real raportat la primar

$$\underline{U}_1 = \underline{Z}_1 \cdot \underline{I}_1 - \underline{E}_1$$

$$\underline{E}_1 = -\underline{Z}_{m1} \cdot \underline{I}_{m1}$$

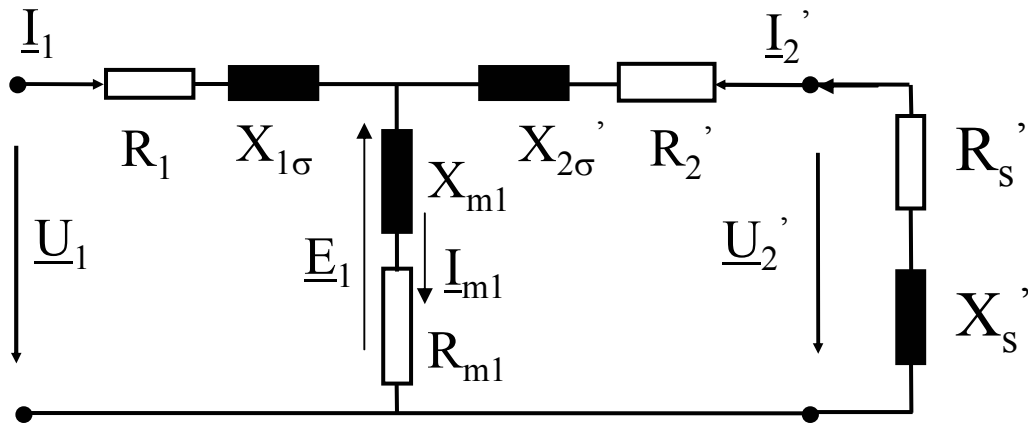
$$\underline{U}'_2 = \underline{Z}'_2 \cdot \underline{I}'_2 - \underline{E}'_2$$

$$\underline{I}_{m1} = \underline{I}_1 + \underline{I}'_2$$



# Schemele echivalente în regim sinusoidal

schema echivalentă în T cu sarcină din secundar

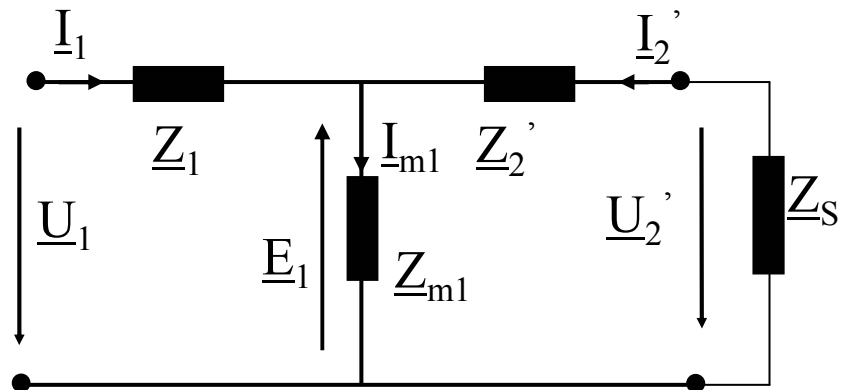


$$\underline{U}_1 = \underline{Z}_1 \cdot \underline{I}_1 - \underline{E}_1$$

$$\underline{U}'_2 = \underline{Z}'_2 \cdot \underline{I}'_2 - \underline{E}'_2$$

$$\underline{E}_1 = -\underline{Z}_{m1} \cdot \underline{I}_{m1}$$

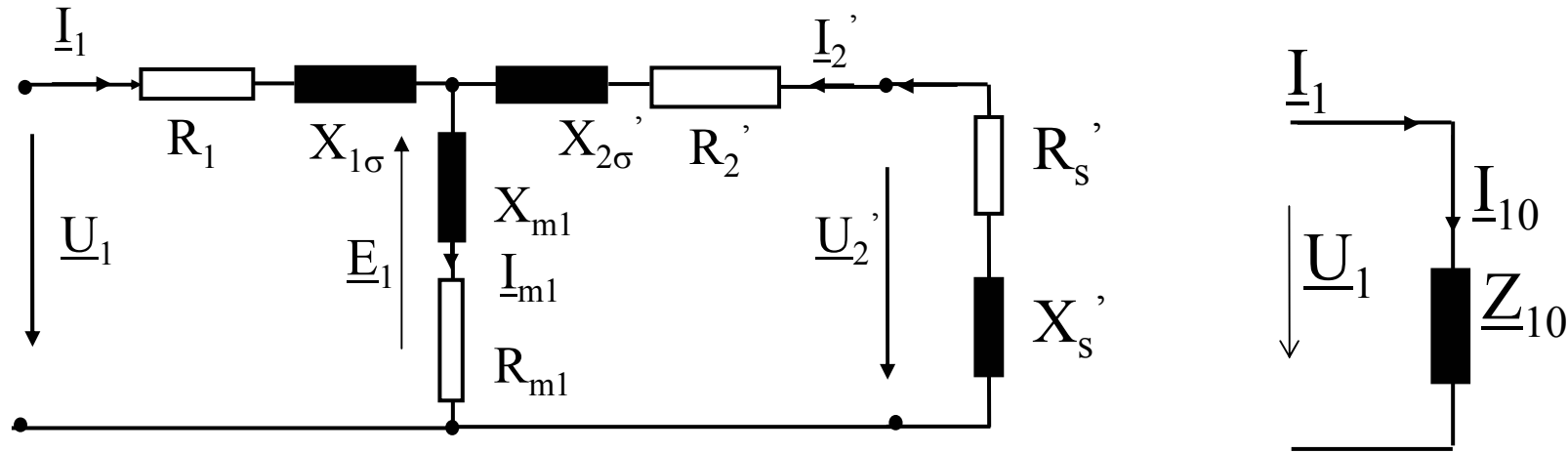
$$\underline{I}_{m1} = \underline{I}_1 + \underline{I}'_2$$



$$-\underline{U}'_2 = R'_s \cdot \underline{I}'_2 + j \cdot X'_s \cdot \underline{I}'_2$$

# Funcționarea transformatorului la mersul în gol

Regim de mers în gol :  $i_2 = 0$  și  $P_2 = 0$



Curentul absorbit:  $I_{10} = I_{1m}$

Impedanța de mers în gol

$$\underline{Z}_{10} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_{1m}$$



## Funcționarea transformatorului la mersul în gol

Puterea absorbită :  $P_{10} = p_{Fe} + p_{b0}$

Pentru  $U_{1N}$  se măsoară :

-curentul de mers în gol  $i_0 = \frac{I_{10}}{I_{1N}} < 0,1$

-raportul de transformare

$$k = \frac{w_1}{w_2} = \frac{E_1}{E_2} \cong \frac{|U_1 - Z_1 \cdot I_{10}|}{U_2} \cong \frac{U_1}{U_2}$$

-pierderile în fier, deoarece  $p_{b2} = 0$

si  $p_{b1} = R_1 \cdot I_{10}^2$   $p_{Fe} \cong P_{10}$

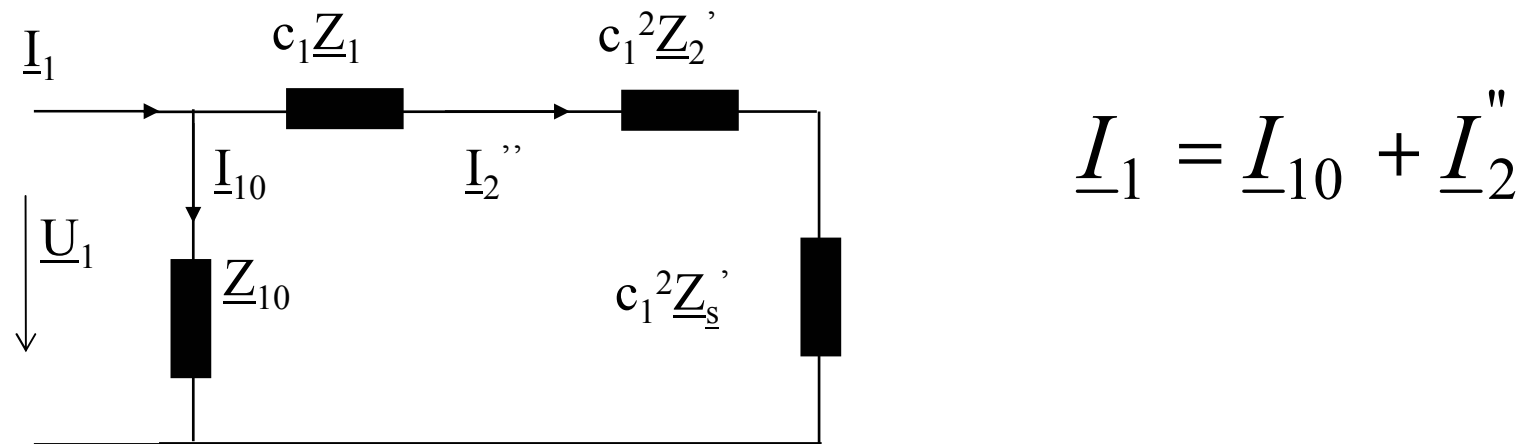
## Schemele echivalente în regim sinusoidal

Constanta transformatorului:      Dinspre primar       $\underline{Z}_{10} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_{m1}$

$$\underline{c}_1 = \frac{\underline{Z}_{10}}{\underline{Z}_{m1}} \quad c_1 \cong \frac{X_{10}}{X_{m1}} = \frac{X_{m1} + X_{\sigma 1}}{X_{m1}}$$

schema echivalentă în **L**

Cu circuitul de magnetizare scos la borne – curentul  $I_{10}$  este constant



# Funcționarea transformatorului în scurtcircuit

Funcționare la scurtcircuit

$$u_2 = 0$$

$$P_2 = 0$$

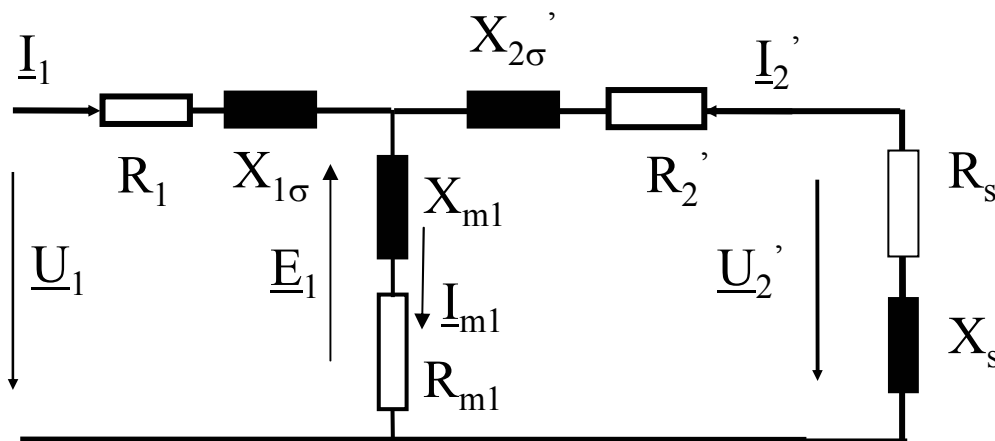
- de probă

$$U_{1sc} < U_{1N}$$

$$I_{1sc} = I_{1N}$$

- de exploatare

$$U_{1sc} = U_{1N}$$



$$I_{m1} \ll I_N$$

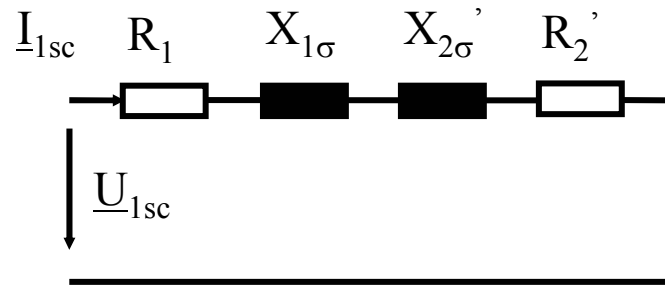
Impedanța de scurtcircuit :

$$\underline{Z}_{1sc} = R_1 + R_2' + j(X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')$$

## Funcționarea transformatorului în scurtcircuit

**Proba de scurtcircuit** : la  $I_{1sc} = I_{1N}$   $U_{1scN} =$  tensiune nominală de scurtcircuit: 4 %, 6 %, 10 %.

$$u_{1scN} = \frac{U_{1sc}}{U_{1N}} \quad u_{sca} = \frac{R_{1sc} \cdot I_{1N}}{U_{1N}} \quad u_{scr} = \frac{X_{1sc} \cdot I_{1N}}{U_{1N}}$$



deoarece

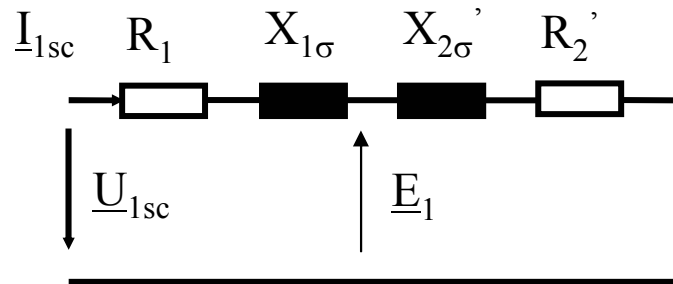
$$p_{Fe} = \left( \frac{U_{1sc}}{U_{1N}} \right)^\alpha \cdot p_{FeN} \cong 0 \quad P_{1sc} \cong p_{bsc} = R_{1sc} \cdot I_{1sc}^2 \cong p_{bN}$$

# Funcționarea transformatorului în scurtcircuit

**Scurtcircuit de exploatare** neglijând saturația :

$$I_{1sc} \cong \frac{U_1}{U_{1scN}} I_{1N} = \frac{I_{1N}}{u_{1sc}}$$

$$I_{2sc} \cong k \cdot I_{1sc}$$



$$E_{1sc} \approx \frac{E_1}{2}$$

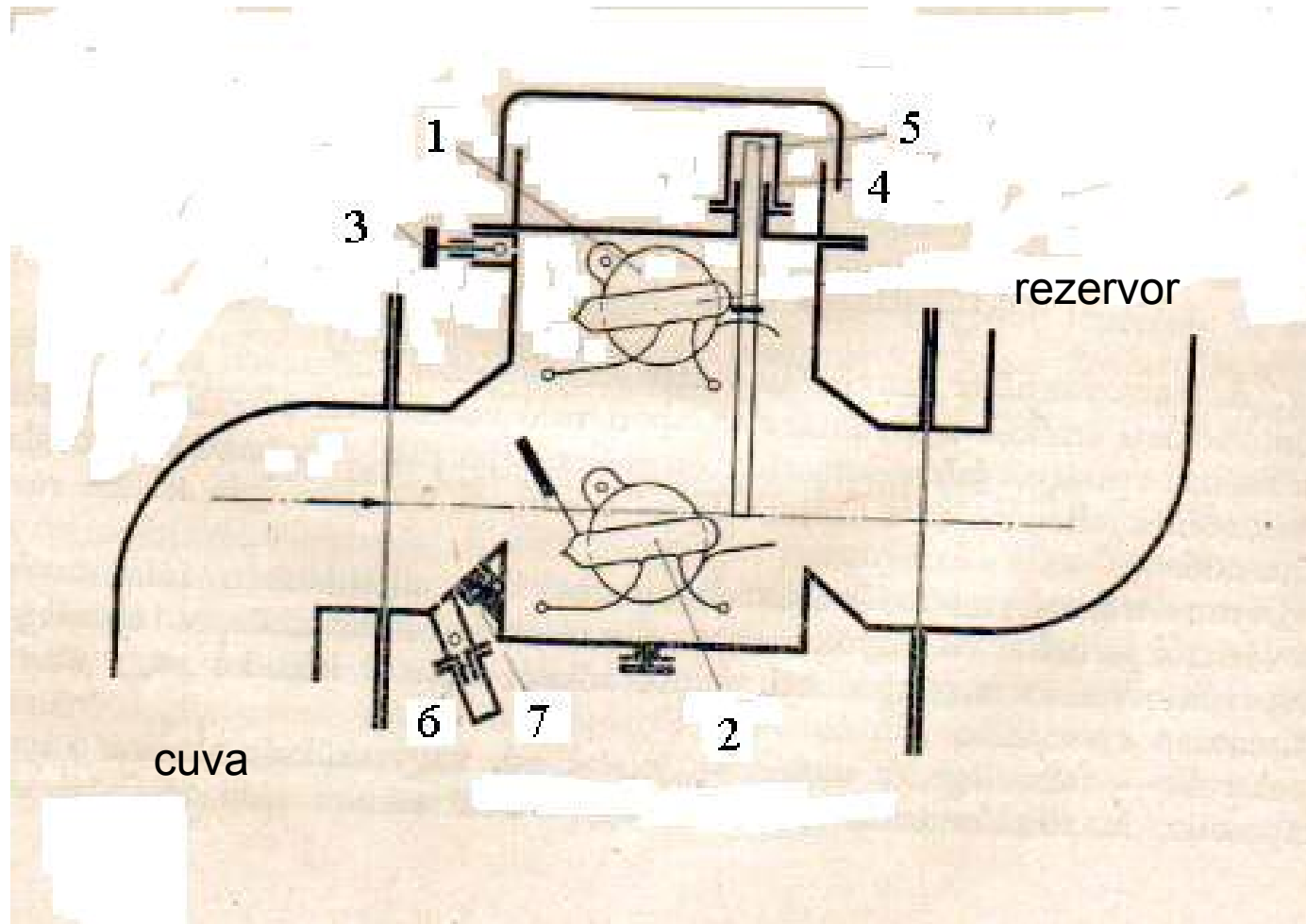
$$p_{Fe} < p_{FeN}$$

$$p_{bsc} \cong \frac{p_{bN}}{2} \gg p_{bN}$$

$$S_{sc} = \frac{1}{u_{sc}} S_N$$

**Regim de avarie** necesită deconectare rapidă.

# Releul de gaze - Buchholz

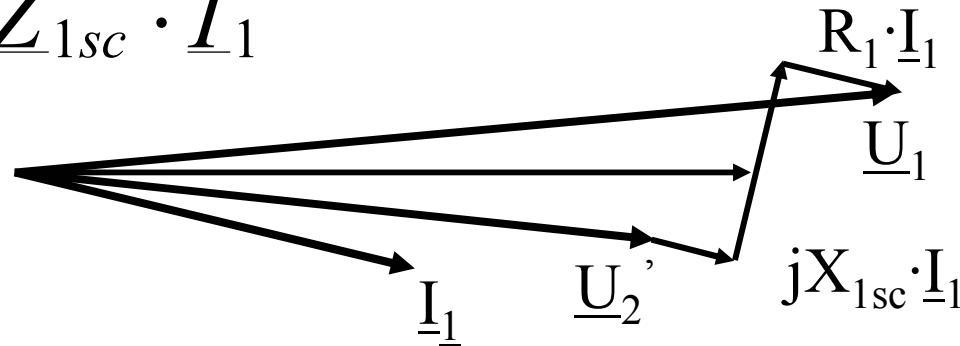


## Functionarea transformatorului în sarcină.

### Cădere de tensiune :

Se neglijează: curentul de magnetizare  $i_{m1}$      $\underline{I}_1 = - \underline{I}_2'$

$$\underline{U}_1 - \underline{U}_2' = \underline{Z}_{1sc} \cdot \underline{I}_1$$



$$\Delta u = \frac{U_1 - U_2'}{U_1} = \beta \cdot (u_{sca} \cdot \cos \varphi_2 + u_{scr} \cdot \sin \varphi_2)$$

Unde:       $\beta = \frac{I_2}{I_{2N}}$        $\cos \varphi_2 = \frac{P_2}{U_2 \cdot I_2}$

## Functionarea transformatorului în sarcină

### Randamentul transformatorului.

Se neglijează căderea de tensiune  $\Delta u \approx 0$

Expresia puterii utile:

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 = \beta \cdot S_N \cdot \cos \varphi_2$$

pierderi:

$$\sum p = p_{Fe} + p_b = p_{Fe} + p_{bN} \cdot \beta^2$$

randamentul :

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \sum p} = \frac{\beta \cdot S_N \cdot \cos \varphi_2}{\beta \cdot S_N \cdot \cos \varphi_2 + p_{Fe} + \beta^2 \cdot p_{bN}}$$



## Functionarea transformatorului în sarcină

Randamentul maxim :

Se calculează :

$$\frac{d\eta}{d\beta} = 0$$

Rezultă: sarcina la care randamentul este maxim,  
Nu depinde de factorul de putere .

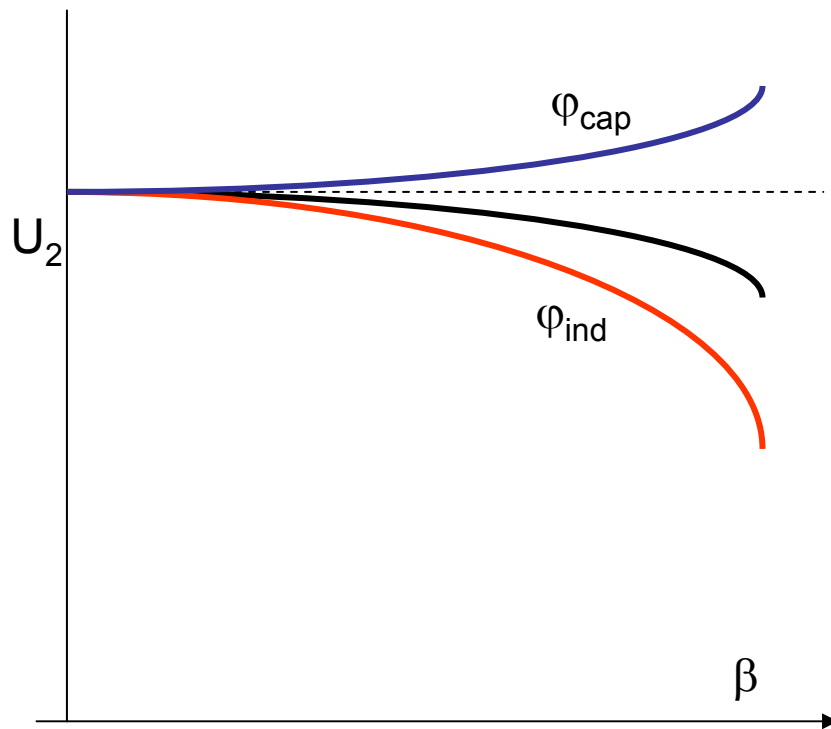
$$\beta_0 = \sqrt{\frac{P_{Fe}}{P_{bN}}}$$

$$\eta_m = \frac{S_N \cdot \cos \varphi_2}{S_N \cdot \cos \varphi_2 + 2 \cdot \sqrt{P_{Fe} \cdot P_{bN}}}$$

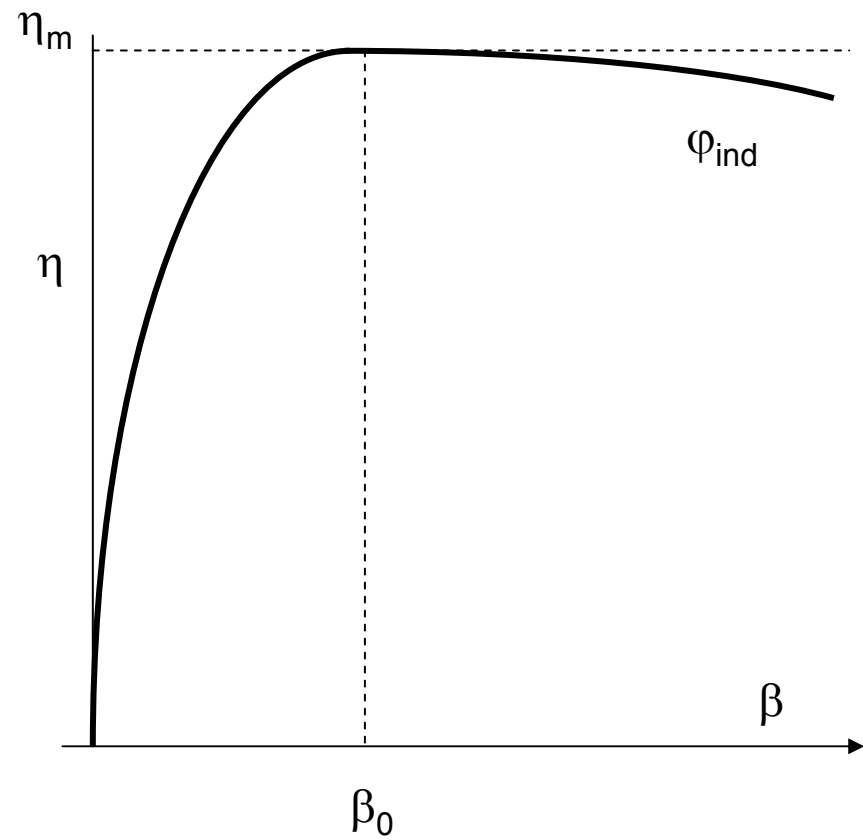
Randamentul maxim depinde de factorul de putere

# Caracteristicile transformatorului

Variația tensiunii secundare



Caracteristica randamentului



---

# Transformator monofazat

---

Exemplu de calcul

---

## Datele transformatorului

Puterea nominală  $S_n = 6 \text{ kVA}$

Tensiunea primară nominală  $U_{1n} = 400 \text{ V}$

Tensiunea secundară nominală  $U_{2n} = 230 \text{ V}$

Parametrii măsurabili :

Rezistența înfășurare primară  $R_1 = 0,55 \Omega$

Rezistența înfășurare secundară  $R_2 = 0,15 \Omega$

Inercarea de mers în gol la tensiunea primară nominală:

Curentul de mers în gol  $I_{10} = 1,5 \text{ A}$

Puterea la mersul în gol  $P_{10} = 60 \text{ W}$

Tensiunea secundară  $U_{20} = 228 \text{ V}$

---

## Calculul parametrilor schemei echivalente din încercări.

Inercarea de mers in scurtcircuit la curentul prima nominal

$$\text{Tensiunea de scurtcircuit } U_{1sc} = 32 \text{ V}$$

$$\text{Puterea la mersul in scurtcircuit } P_{1sc} = 225 \text{ w}$$

Calculul parametrilor schemei echivalente: la mers în gol

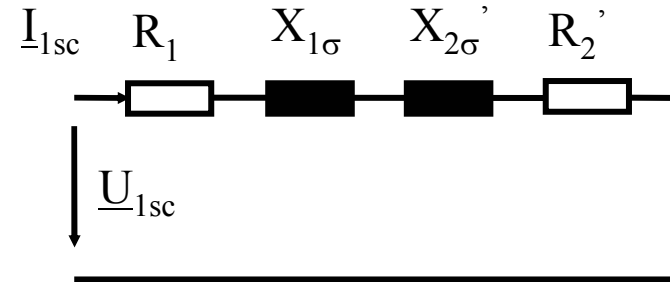
$$\text{Impedanta de mers in gol : } Z_{10} = \frac{U_{1n}}{I_{10}} = \frac{400}{1,5} = 266,6 \quad \Omega$$

$$\text{Rezistenta de mers in gol: } R_{10} = \frac{P_{10}}{I_{10}^2} = \frac{60}{1,5^2} = 26,66 \quad \Omega$$

$$\text{Reactanta de mers in gol : } X_{10} = \sqrt{Z_{10}^2 - R_{10}^2} = 265,38 \quad \Omega$$

## Calculul parametrilor schemei echivalente din încercări.

la mers în scurtcircuit



Impedanta de mers in scurtcircuit :

$$Z_{1sc} = \frac{U_{1sc}}{I_{1n}} = \frac{32}{15} = 2,13 \quad \Omega$$

Rezistenta de scurtcircuit

$$R_{1sc} = \frac{P_{1sc}}{I_{1n}^2} = \frac{225}{15^2} = 1 \quad \Omega$$

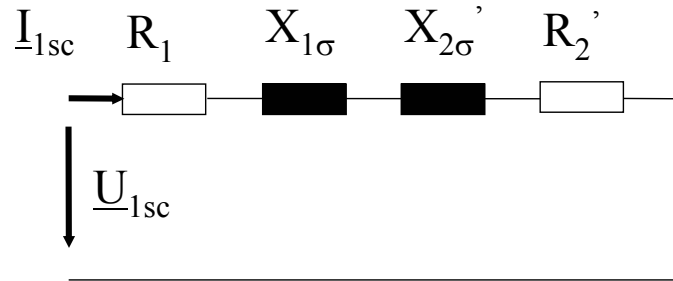
Reactanta de scurtcircuit

$$X_{1sc} = \sqrt{Z_{1sc}^2 - R_{1sc}^2} = 1,88 \quad \Omega$$

Curentul nominal

$$I_{1n} = \frac{S_n}{U_{1n}} = \frac{6000}{400} = 15 \quad A$$

# Separarea parametrilor



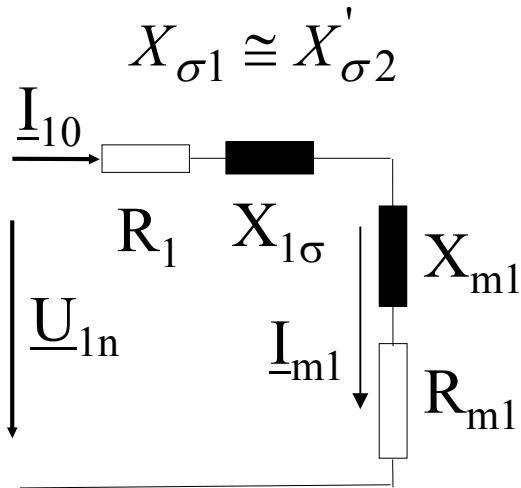
$$R_2' = R_{1sc} - R_1 = 0,45 \quad \Omega$$

$$R_2' = R_2 \cdot k^2 = 0,15 \cdot 1,73^2 = 0,45 \quad \Omega$$

$$\frac{R_1}{R_2'} \approx \frac{X_{\sigma 1}}{X_{\sigma 2}'}$$

ipoteze

$$X_{\sigma 1} = \frac{X_{1sc}}{1 + \frac{R_2'}{R_1}} = \frac{1,88}{1 + \frac{0,45}{0,55}} = 1,03 \quad \Omega$$



$$X_{\sigma 2}' = X_{1sc} - X_{\sigma 1} = 0,85 \quad \Omega$$

$$R_{m1} = R_0 - R_1 = 26,66 - 0,55 = 26,11 \quad \Omega$$

$$X_{m1} = X_{10} - X_{\sigma 1} = 266,66 - 1,03 = 265,63 \quad \Omega$$

## Calculul curentului de mers în gol

Constanta transformatorului:

$$\underline{c}_1 = \frac{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{m1}}{\underline{Z}_{m1}} = \frac{\underline{Z}_0}{\underline{Z}_{m1}} = \frac{26,66 + j266,66}{26,11 + j265,63} = 1,004 - j1,63 \cdot 10^{-3}$$

$$\underline{c}_1 \cong \frac{X_{10}}{X_{m1}} = \frac{266,66}{265,63} = 1,004$$

Curentul de mers in gol 2 metode:

1 
$$\underline{I}_{10} = \frac{U_{1n}}{\underline{Z}_{10}} = \frac{400}{26,66 + j266,66} = 0,148 - j1,485$$

2 
$$\cos \varphi_{10} = \frac{P_{10}}{U_{1n} \cdot I_{1n}} = \frac{60}{400 \cdot 1,5} = 0,1$$

$$\underline{I}_{10} = I_{10} \cdot (\cos \varphi_{10} - j \sin \varphi_{10}) = 0,15 - j1,492$$



## Calculul raportului de transformare

Pierderile în fier:

$$P_{Fe} = P_{10} - R_1 \cdot I_{10}^2 = 60 - 0,55 \cdot 1,5^2 = 58,76 \quad w$$

Rezistența echivalentă a pierderilor în fier:  $R_{m1} = \frac{P_{Fe}}{I_{10}^2} = \frac{58,76}{1,5^2} = 26,11 \quad \Omega$

Raportul de transformare:

$$k_{\text{exp}} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{E_1}{E_2} \cong \frac{|U_1 - Z_1 \cdot I_{10}|}{U_2} = \frac{|398,71 + j0,66|}{228} = 1,747$$

eroarea

$$\Delta k = \frac{|k - k_{\text{exp}}|}{\sqrt{k \cdot k_{\text{exp}}}} = 4,65 \cdot 10^{-3}$$

## Transformator in sarcină

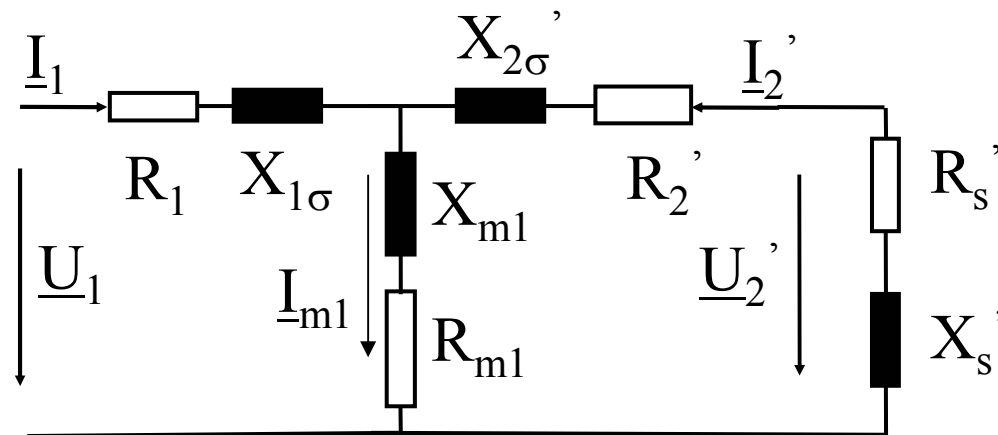
Datele sarcinii:  $R_s = 8 \Omega$ ,  $L_s = 0,015 \text{ H}$

Raportarea sarcinii la primar:

$$R_s' = R_s \cdot k^2 = 8 \cdot 1,739^2 = 24,2 \Omega$$

$$X_s = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_s = 4,71 \Omega$$

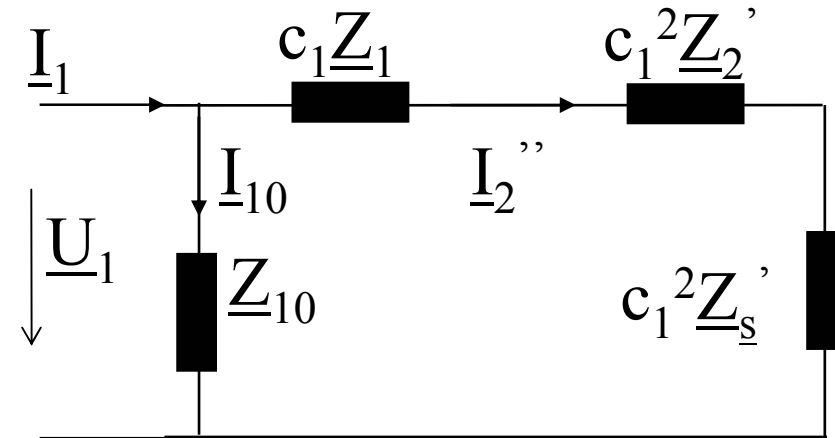
$$X_s' = X_s \cdot k^2 = 14,25 \Omega$$



## Transformator în sarcină

Calculul curentului în sarcină:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{10} + \underline{I}_2''$$



$$\underline{I}_2'' = \frac{U_{1n}}{c_1 \cdot (\underline{Z}_1 + c_1 \cdot \underline{Z}_2' + c_1 \cdot \underline{Z}_s')} = 11,17 - j7,15 \quad A$$

$$\underline{I}_1 = 11,32 - j8,65 \quad A$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{\Re(\underline{I}_2'')}{|\underline{I}_2''|} = \frac{11,17}{13,27} = 0,842$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{\Re(\underline{I}_1)}{|\underline{I}_1|} = \frac{11,32}{14,25} = 0,795$$

Diferența se datorește curentului de mers în gol.

## Randamentul

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \sum p} = \frac{\beta \cdot S_N \cdot \cos \varphi_2}{\beta \cdot S_N \cdot \cos \varphi_2 + p_{Fe} + \beta^2 \cdot p_{bn}}$$

Puterea utilă

$$P_2 = \beta \cdot S_N \cdot \cos \varphi_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 \cong U_{1n} \cdot \Re\{\underline{I}_2''\}$$

$$P_2 = 400 \cdot 11,17 = 4468 \quad w$$

Pierderi în bobinaje

$$p_b = \beta^2 \cdot p_{bn} = R_1 \cdot I_1^2 + R_2' \cdot I_2'^2 \cong 0,55 \cdot 14,25^2 + 1,004 \cdot 0,45 \cdot 13,27^2 = 191,44 \quad w$$

Aproximări posibile: 
$$p_b \cong R_{1sc} \cdot I_1^2 = 1 \cdot 14,25^2 = 202,95 \quad w$$

$$p_b \cong c_1 \cdot (R_1 + c_1 \cdot R_2') \cdot I_2''^2 = 1,004 \cdot (0,55 + 1,004 \cdot 0,45) \cdot 13,27^2 = 177 \quad w$$

## Randamentul

Randamentul:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + p_{Fe} + p_b} = \frac{4468}{4468 + 58,76 + 191,44} = 0,947$$

Randamentul maxim

$$\eta_m = \frac{S_N \cdot \cos \varphi_2}{S_N \cdot \cos \varphi_2 + 2 \cdot \sqrt{p_{Fe} \cdot p_{bn}}}$$

Sarcina la care se obține randament maxim

$$\beta_o = \sqrt{\frac{p_{Fe}}{p_{bn}}} = \sqrt{\frac{58,76}{225}} = 0,51$$

$$\eta_m = \frac{6000 \cdot 0,842}{6000 \cdot 0,842 + 2 \cdot \sqrt{58,76 \cdot 191,44}} = 0,956$$

## Tensiunea secundară

Căderea de tensiune: 
$$\Delta u = \frac{U_1 - U_2'}{U_1} = \beta \cdot (u_{sca} \cdot \cos \varphi_2 + u_{scr} \cdot \sin \varphi_2)$$

Factorul de sarcină 
$$\beta = \frac{|I_2''|}{I_{1n}} = \frac{13,27}{15} = 0,8846$$

Componenta activa a tensiunii de scurtcircuit 
$$u_{sca} = \frac{R_{1sc} \cdot I_{1N}}{U_{1N}} = \frac{1 \cdot 15}{400} = 0,0375$$

Componenta reactivă a tensiunii de scurtcircuit 
$$u_{scr} = \frac{X_{1sc} \cdot I_{1N}}{U_{1N}} = \frac{1,88 \cdot 15}{400} = 0,0706$$

$$\Delta u = 0,8846 \cdot (0,0375 \cdot 0,842 + 0,0706 \cdot 0,539) = 0,062$$

Tensiunea secundară 
$$U_2' = (1 - \Delta u) \cdot U_{1n} = (1 - 0,062) \cdot 400 = 375,3 \text{ V}$$

Valoarea reală : 
$$U_2 = \frac{U_2'}{k} = \frac{375,3}{1,739} = 215,8 \text{ V}$$