



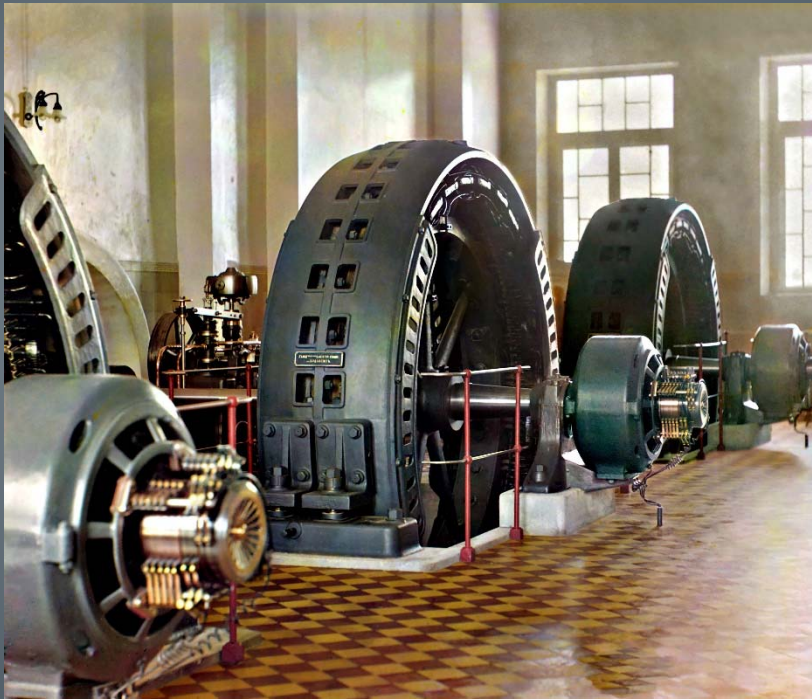
Masini electrice I
CURS



Conf.
Leonard LIVADARU

Masini electrice I

ELECTRIC ENERGY GENERATION



HYDRO POWER PLANTS

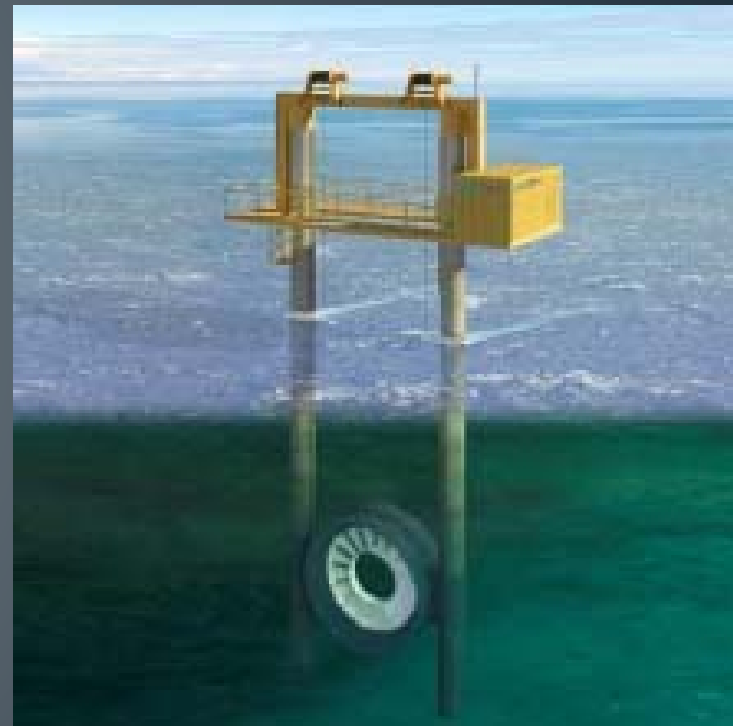
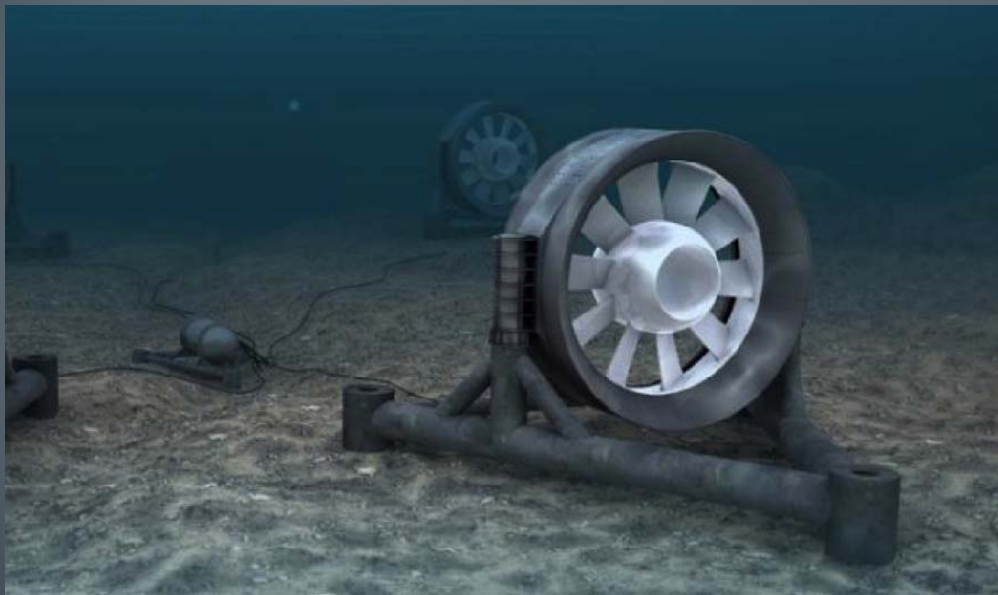


ELECTRIC ENERGY GENERATION



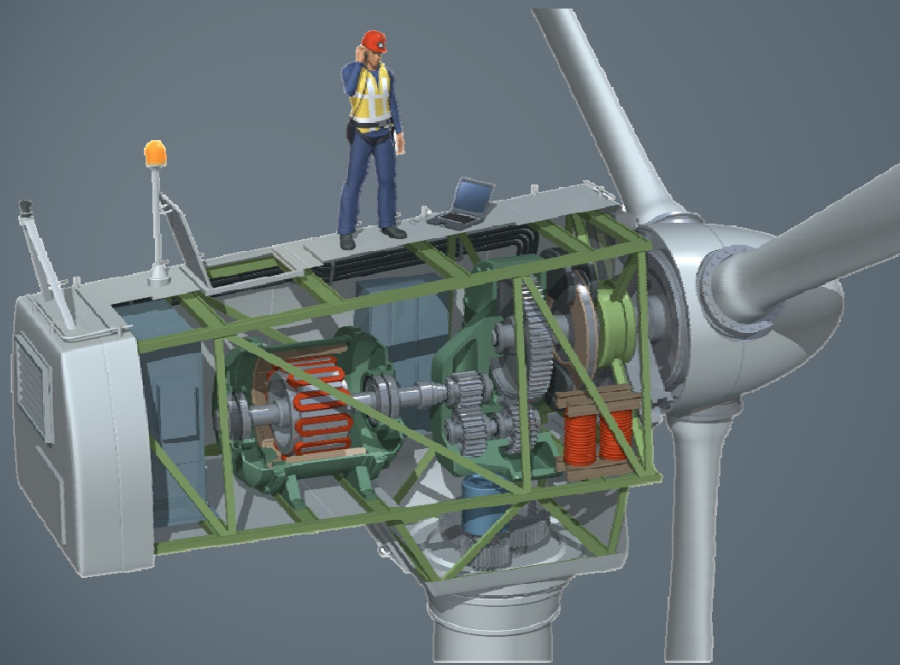
COAL POWER PLANTS

ELECTRIC ENERGY GENERATION



MARINE CURRENTS

ELECTRIC ENERGY GENERATION



WIND FARMS





ELECTRIC CAR

TRAMWAY





MAGLEV



TGV

SEGWAY | ninebot



SEGWAY



VECTRIX



APPLIANCES

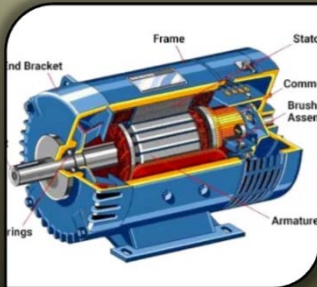




MACHINE TOOLS



Cuprins general:



Mașina de curent continuu

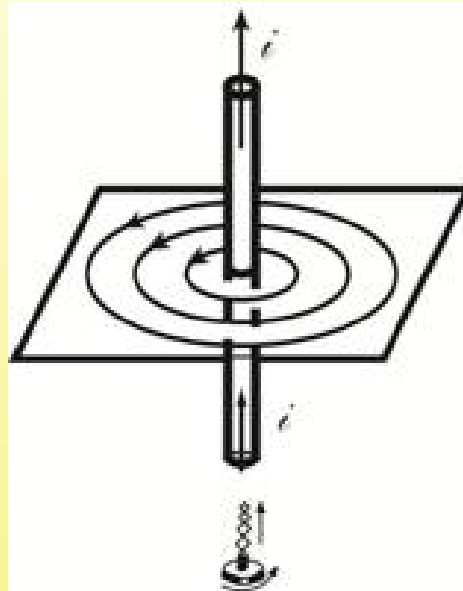


Transformatorul electric

Notiuni generale de electromagnetism



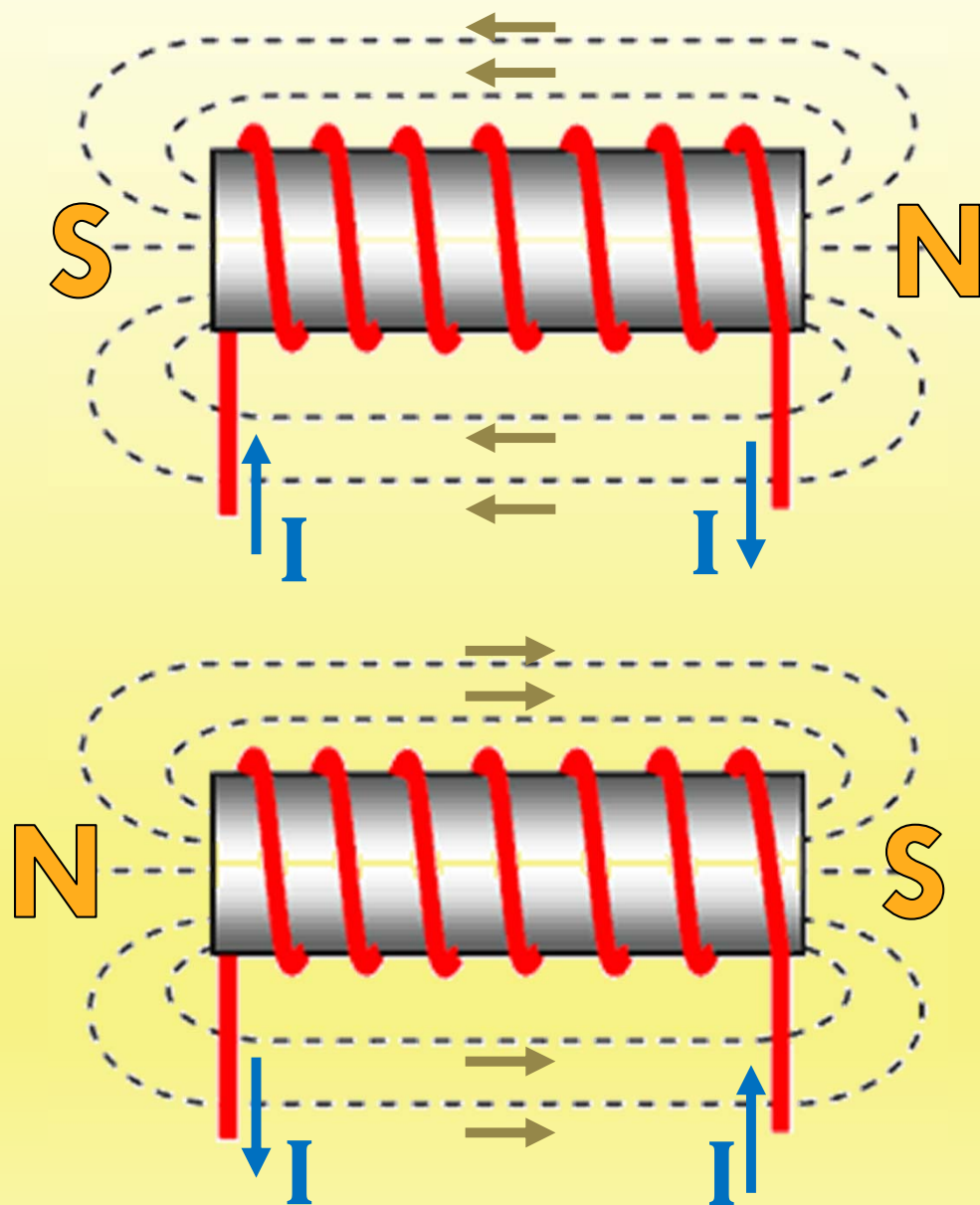
Câmpul magnetic creat de un conductor parcurs de curent



Orice conductor parcurs de curent (alternativ sau continuu) creează în jurul sau un câmp magnetic.

Liniile de câmp se închid într-un plan perpendicular pe axa conductorului și au sensul dat de regula burghiului drept (sensul de rotire a burghiului ce determină mișcarea lui în sensul curentului ce străbate conductorul).

Sensul liniilor de câmp create de o bobina

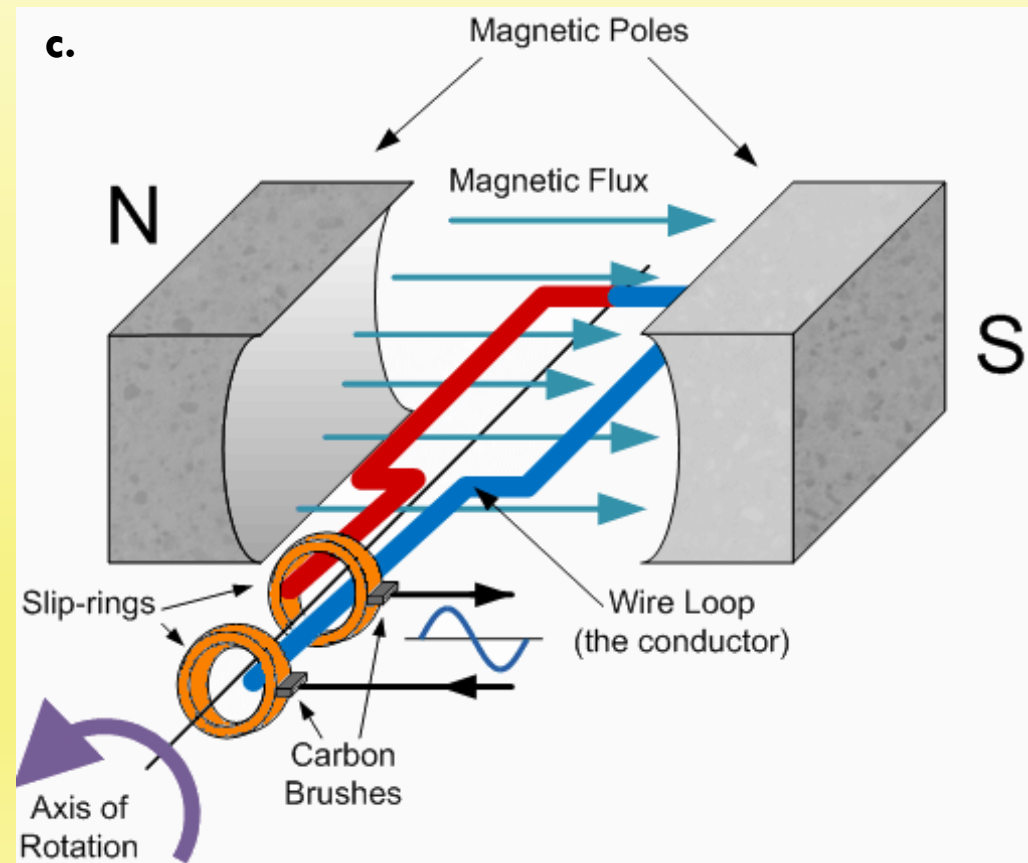
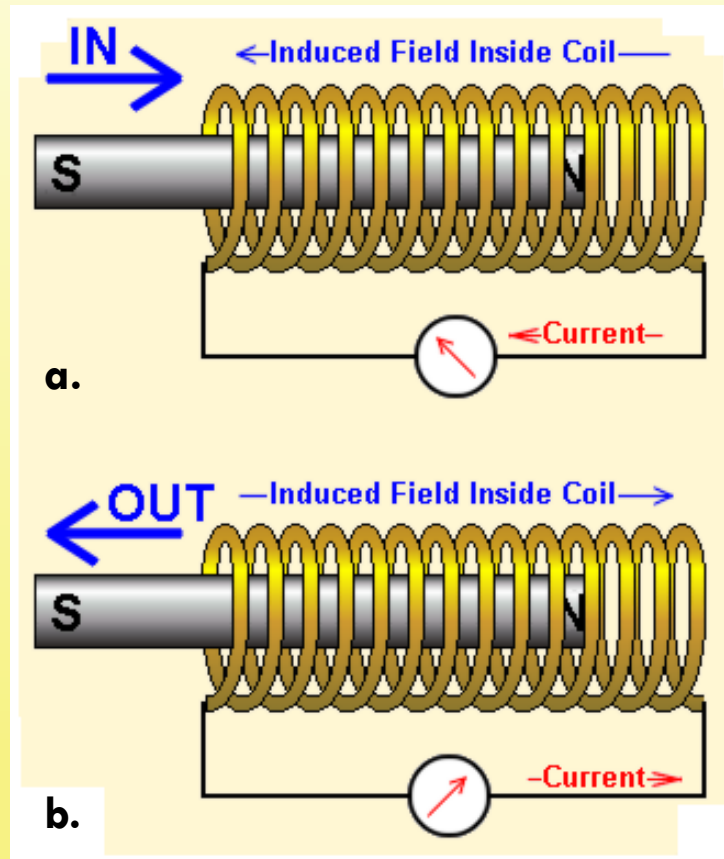


Sensul curentului prin spirele solenoidului determina polaritatea câmpului magnetic creat de acesta.

Convențional, liniile de câmp **ies** din polul N și **intra** în polul S.

Producerea tensiunii prin interacțiunea câmp magnetic – curent electric

Bobina fixa – câmp magnetic în mișcare



Bobina în mișcare – câmp magnetic fix

In figurile a. si b. avem o bara din material magnetic (magnet permanent) ce se deplasează in interiorul unei bobine.

Pe perioada mișcării barei, se induce in bobină o tensiune care este pusă in evidență de galvanometrul legat la capetele bobinei.

Dacă bara magnetica nu se deplasează, chiar dacă ea este in interiorul bobinei, nu se induce nici o tensiune.

Este important si sensul de deplasare al barei magnetice. Atunci când bara intră in bobină tensiunea indusă are un anumit sens, iar când bara magnetică iese din bobină, tensiunea indusă are sens contrar.

In figura c., situația celor două elemente (câmp-bobină) este inversă. Câmpul este imobil (este creat de cei doi magneți N si S) iar bobina se rotește in acest câmp. In spira prezentată se induce o tensiune ce poate fi măsurată la capetele ei.

Cu alte cuvinte, atunci când există o mișcare relativă intre un câmp magnetic si o bobină (înfășurare), va apărea o tensiune indusă. Este vorba despre fenomenul inducției electromagnetice.

Legile lui Faraday (legea inducției electromagnetice)

1. Atunci când un conductor este plasat într-un câmp magnetic VARIABIL se induce o tensiune ce se regăsește la capetele conductorului
2. Mărimea tensiunii induse este proporțională cu viteza de variație a fluxului prin bobină

$$e = k \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$

Legea lui Lenz

Curentul determinat de tensiunea indusă creează un câmp magnetic ce se opune câmpului inițial

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} = -N \cdot \frac{d\varphi}{dt}$$

Cuvinte cheie

BOBINA

+

CÂMP MAGNETIC

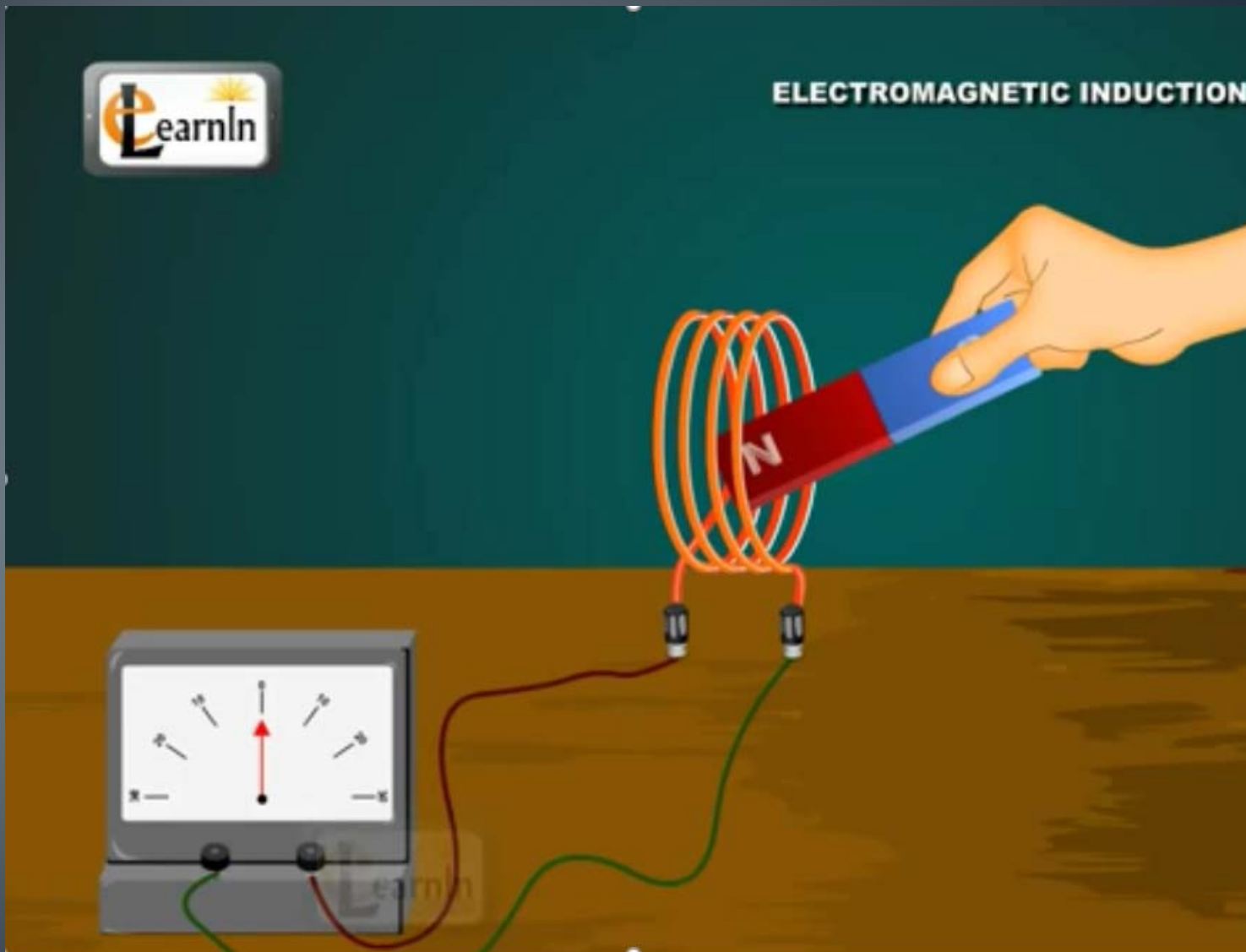
+

MIȘCARE RELATIVĂ (VARIAȚIE)

=

TENSIUNE INDUSA

Film demonstrativ – lege inducției electromagnetice

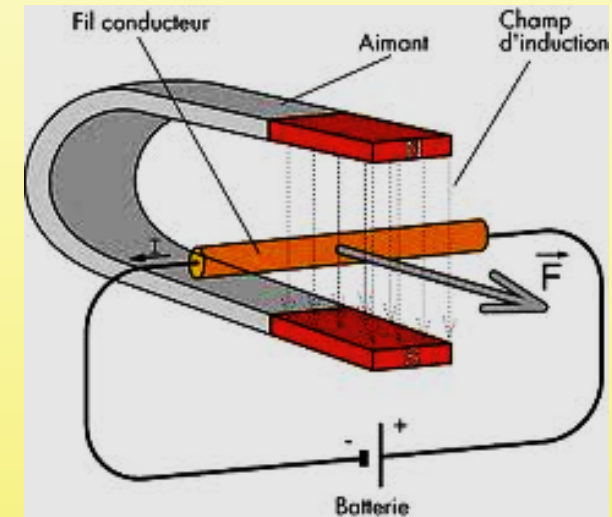


Forța Laplace

Este forța ce acționează asupra unui conductor parcurs de curent și care se află într-un câmp magnetic.

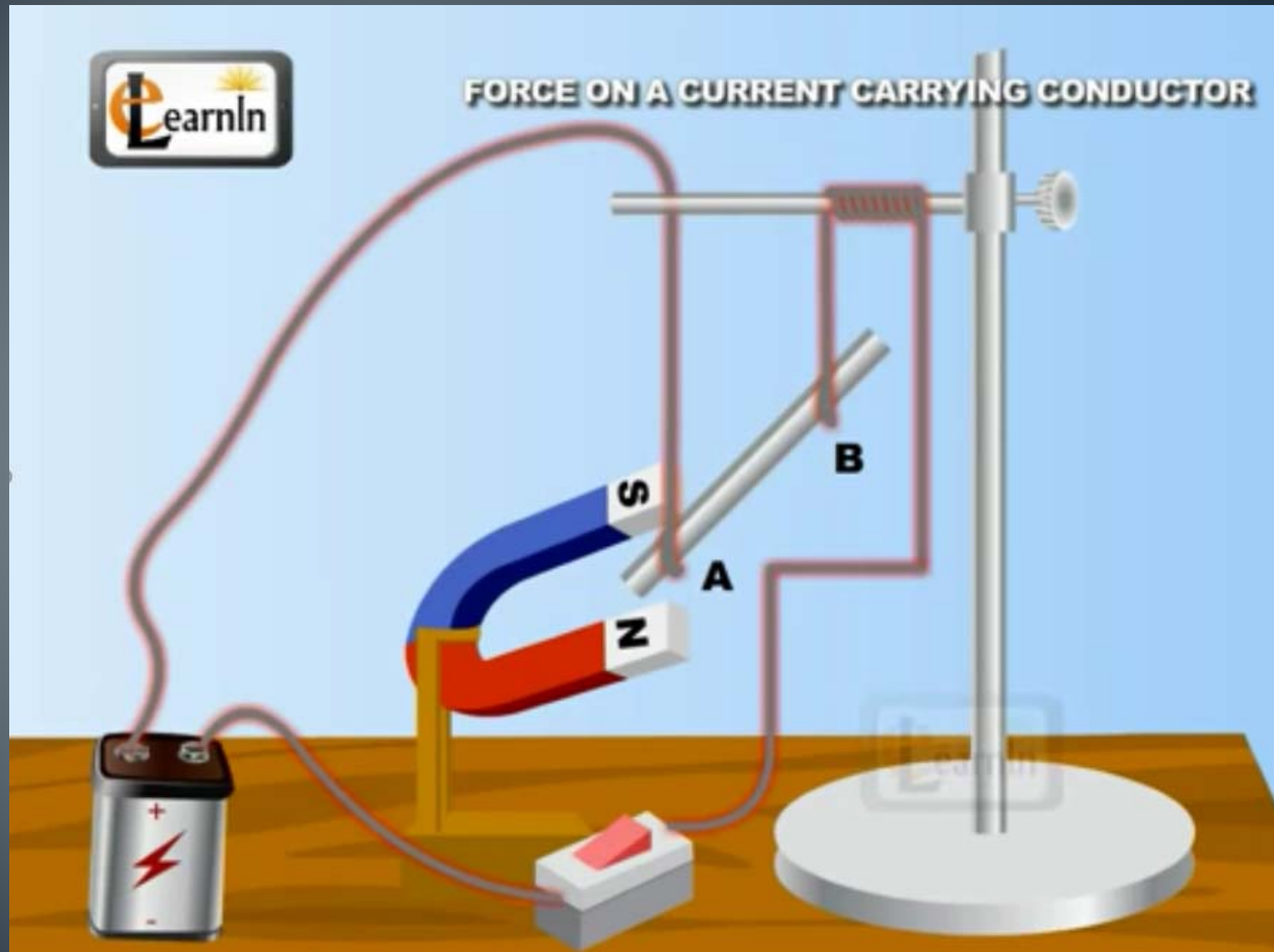
Expresia acestei forțe este dată de :

$$\vec{F} = i \cdot \vec{l} \times \vec{B}$$



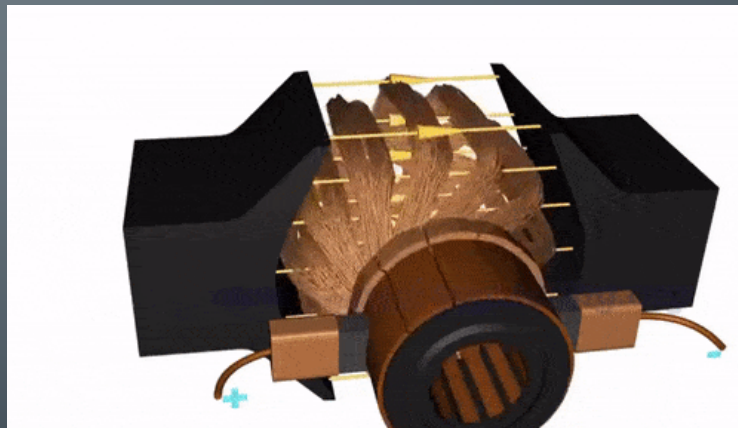
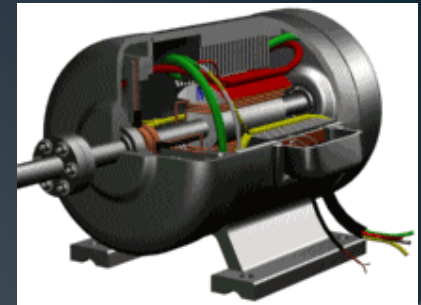
Forța este maximă atunci când direcția curentului și direcția liniilor de câmp formează un unghi de 90° .

Film demonstrativ – producerea forței Laplace

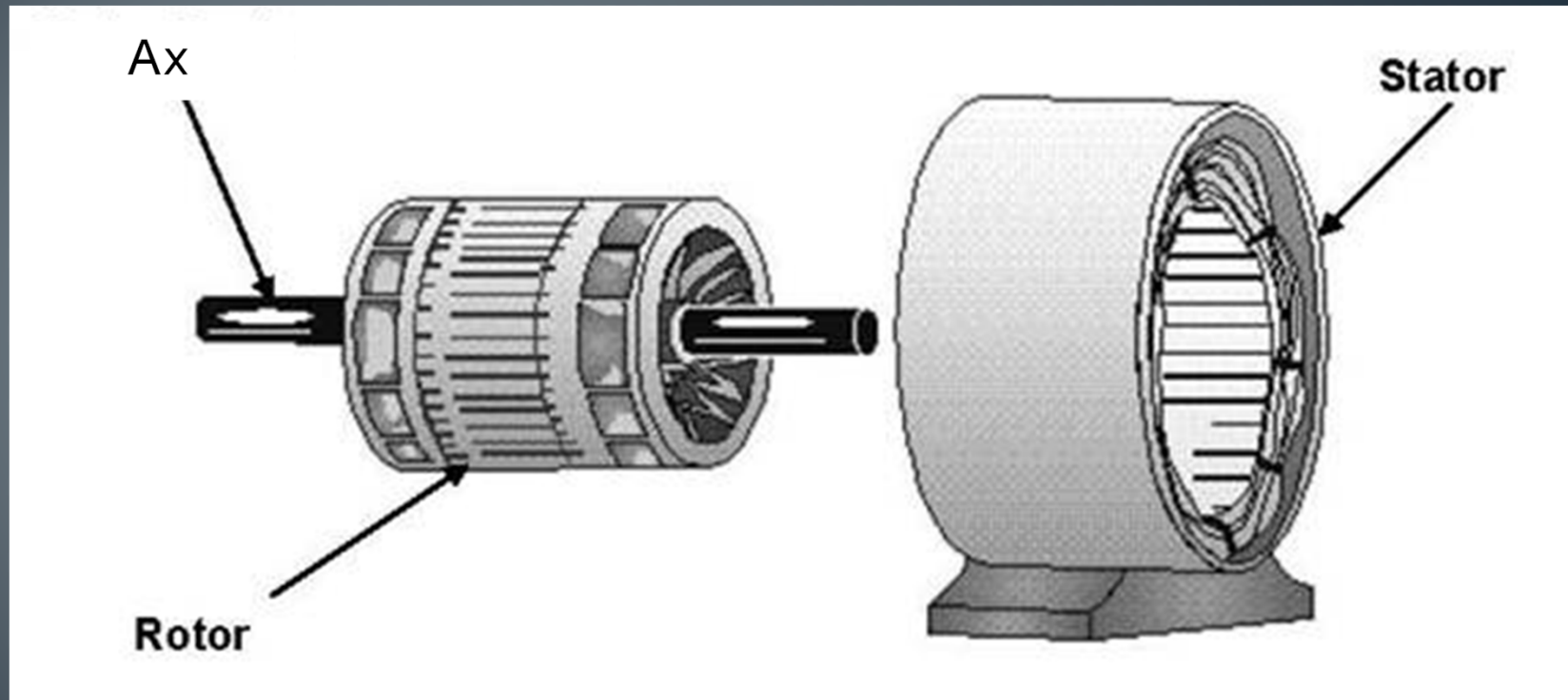


DEFINIȚIE

Mașina electrică este un sistem electromecanic ce transformă energia electrică primită pe la borne, în energie mecanică (funcționare ca motor) sau energia mecanică primită pe la ax, în energie electrică (funcționare ca generator).



Structura unei mașini electrice rotative in construcție radială



Din punct de vedere constructiv, toate mașinile electrice rotative au două elemente principale:

STATORUL – reprezintă partea fixă a unei mașini electrice rotative.

ROTORUL - reprezintă partea mobilă (rotativă) a unei mașini electrice rotative.

De regulă, rotorul este plasat în interiorul statorului.

Atât statorul cât și rotorul sunt construite din material feromagnetic ceea ce permite, pe de o parte, concentrarea câmpului magnetic în anumite regiuni, iar pe de altă parte, obținerea unei energii magnetice cu un consum mai mic de curent.

Atunci când câmpurile magnetice sunt alternative, miezul feromagnetic este realizat din tole, iar când câmpurile magnetice sunt constante, miezurile magnetice sunt realizate din material feromagnetic masiv.



De regula, pe stator și rotor sunt prevăzute înfășurări parcurse de curent electric. Înfășurările sunt realizate din material conductor: cel mai adesea cupru dar și aluminiu.

Miezurile feromagnetice și cuprul (aluminiul) constituie materialele „active” ale unei mașini electrice.

MAȘINA DE C.C.



Mașina electrică ce schimbă energie cu exteriorul (rețea de alimentare sau sarcină electrică) în **curent continuu.**

Elemente constructive

Stator (inductor)



1

Rotor (indus)



2

Sistem colector + perii (redresor sau inverter mecanic)

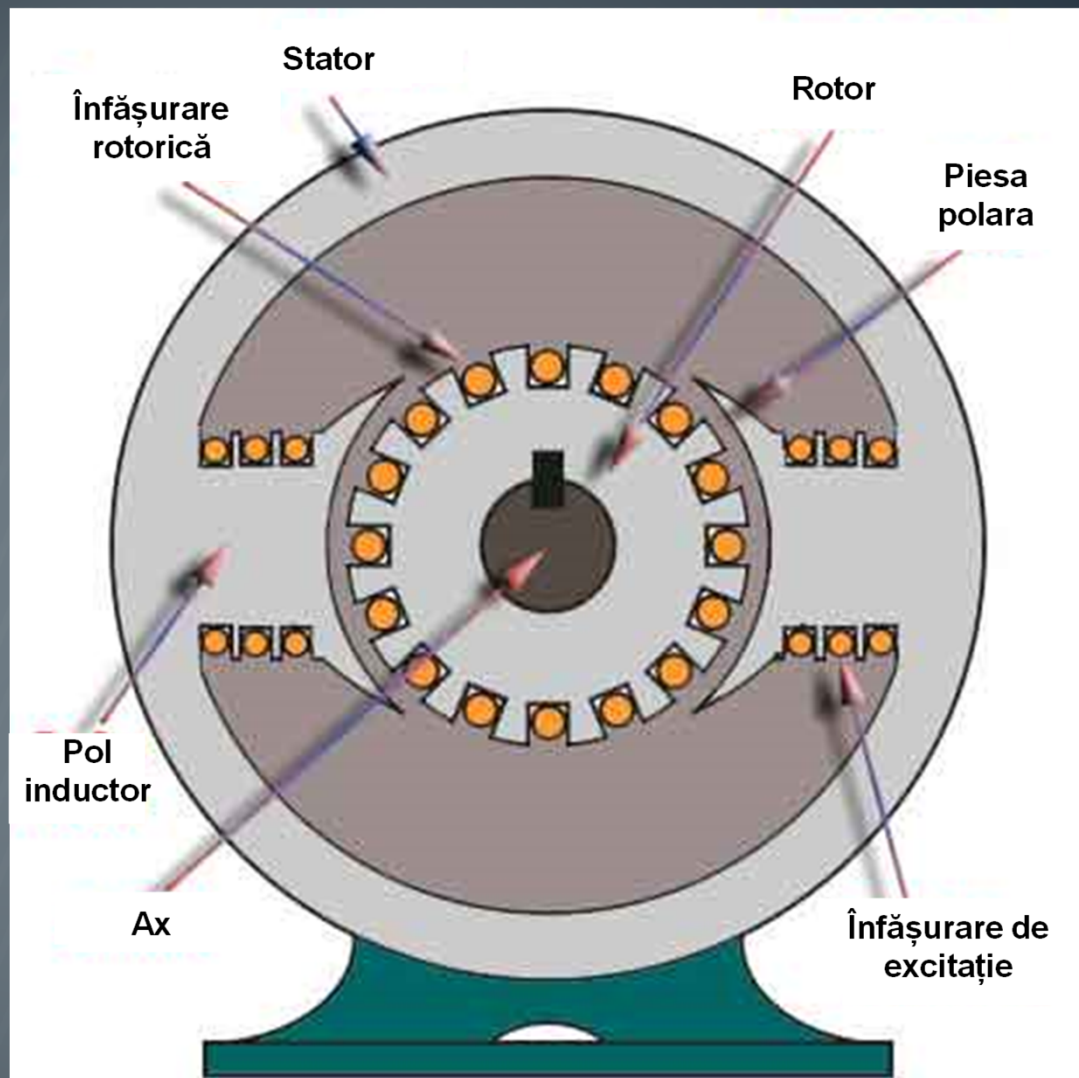


3

Accesorii (ax, lagăre, capace laterale, ventilator, cutie de borne, elemente de susținere, etc.)

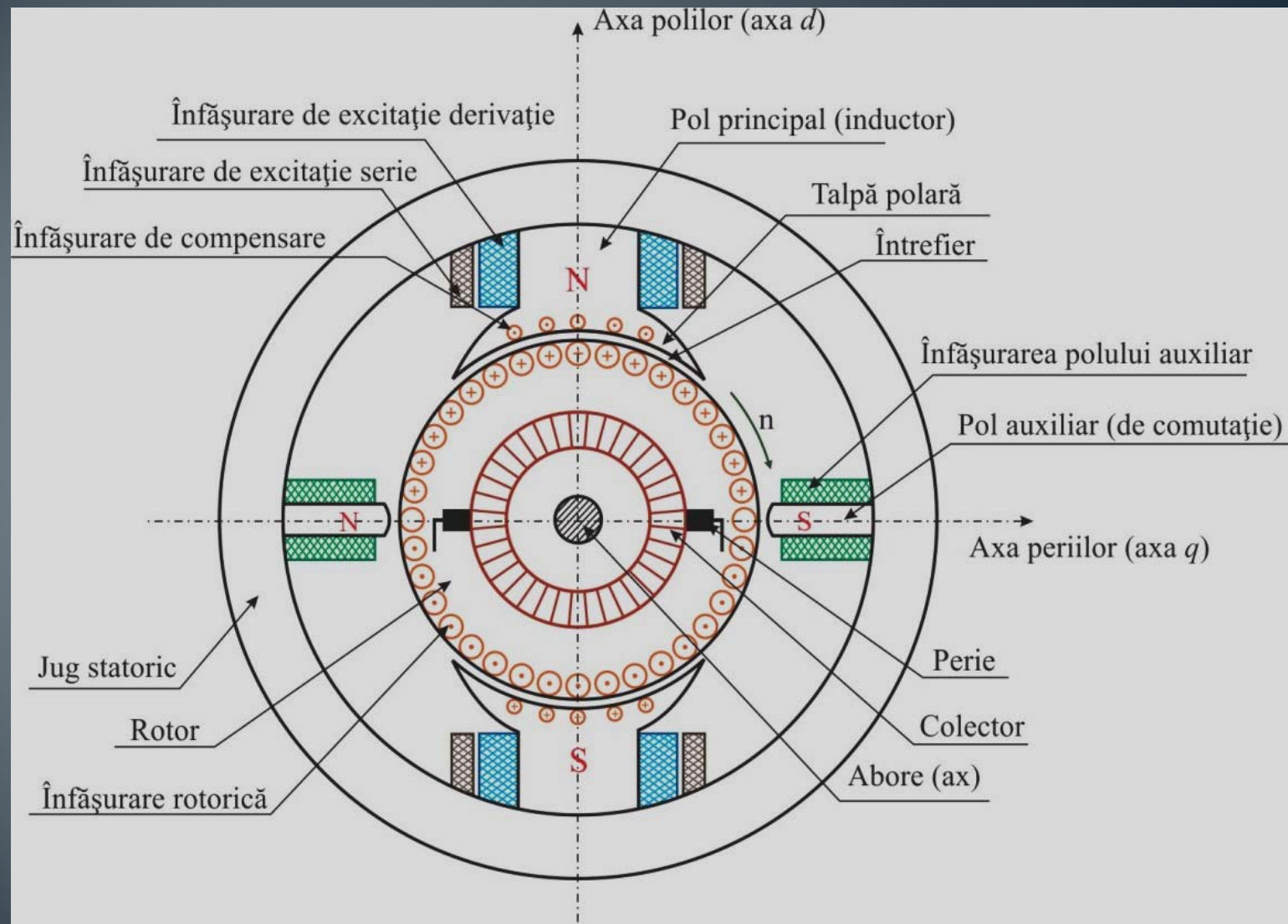


4

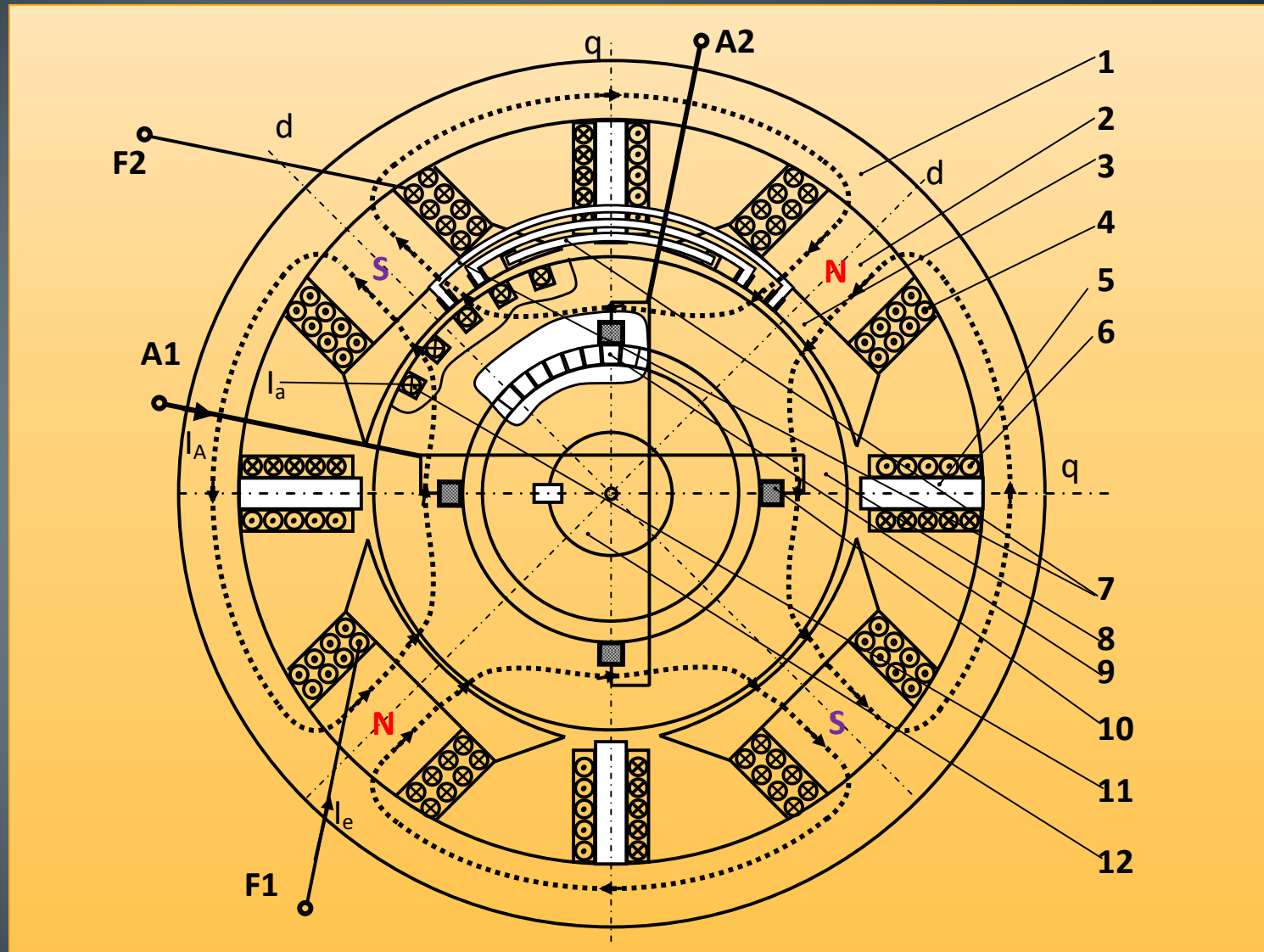


Secțiune transversală printr-o mașină de c.c. in construcție minimală

Structura unei mașini de c.c. prevăzută cu poli auxiliari



Structura unei mașini de c.c. în construcție completă



1-Jug statoric, 2-Pol principal, 3-Piesa polara, 4-Infășurare de excitație, 5-Pol auxiliar, 6-Infășurarea polului auxiliar, 7- Înfășurare de compensare, 8-Jug rotoric, 9-Colector, 10-Perii, 11- Înfășurare rotorica, 12-Ax.

Statorul

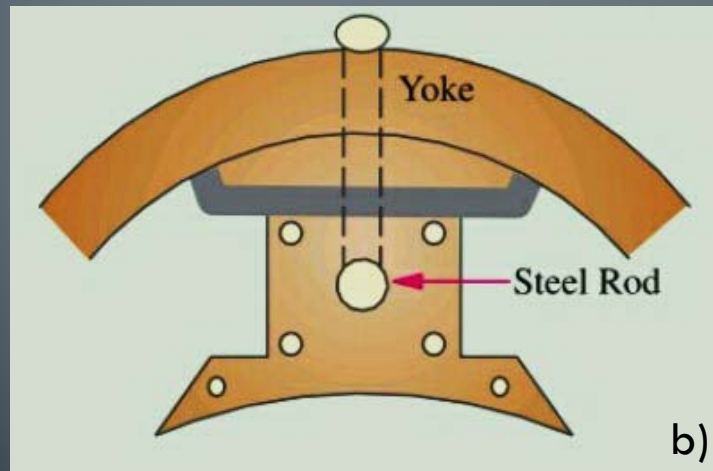
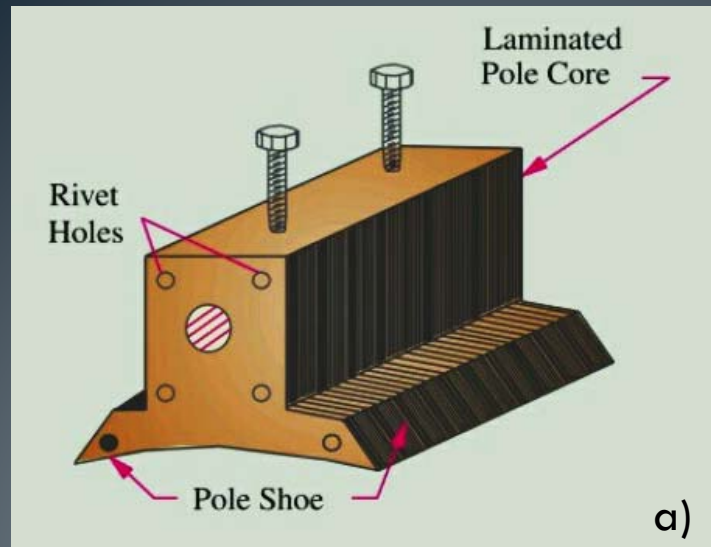
Reprezintă un ansamblu de piese după cum urmează:

- Jugul statoric ce este realizat din oțel masiv cu proprietăți feromagnetice. Liniile câmpului inductor se închid prin jugul statoric. El joacă rol și de carcasă a mașinii.
- Polii principali, denumiți și poli inductori, sunt în număr de $2p$, adică întotdeauna un număr par. Miezul feromagnetic al polilor inductori este realizat din oțel masiv sau tole din tablă feromagnetică cu grosimea cuprinsă între 0,5 mm și 2 mm asamblate împreună prin buloane de strângere.
- Pe miezul polilor inductori sunt plasate înfășurările de excitație (bobinele de excitație). Aceste înfășurări sunt de tip concentrat, fiind realizate din conductor de cupru izolat cu email, fibră de sticlă sau alte materiale izolatoare. Înfășurările de excitație împreună cu miezul polilor alcătuiesc niște electromagneți. Bobinele de excitație sunt astfel conectate încât polii formați să aibă polarități alternante.

La mașinile de puteri mijlocii și mari, între polii inductori se plasează *polii auxiliari* denumiți și *poli de comutație*. Secțiunea miezului polilor auxiliari este mai mică decât secțiunea miezului polilor principali. Pe miezul polilor auxiliari sunt plasate înfășurări de tip concentrat, realizate din conductor de cupru izolat. Aceste înfășurări sunt astfel conectate încât și polii de comutație să formeze un sistem alternant de poli. Înfășurările polilor auxiliar sunt conectate ÎNTOTDEAUNA în SERIE cu înfășurarea de pe rotor.

Mașinile de puteri mari și foarte mari, precum și mașinile destinate acționărilor electrice rapide, se mai echipează cu o *înfășurare de compensare*. Această înfășurare este plasată în creșturile prevăzute în acest scop în piesele polare ale polilor principali. Si această înfășurare, atunci când există, se leagă în serie cu înfășurarea de pe rotor.

Poli principali Înfășurare de excitație



a) Pol principal; b) pol principal prins de jugul statoric



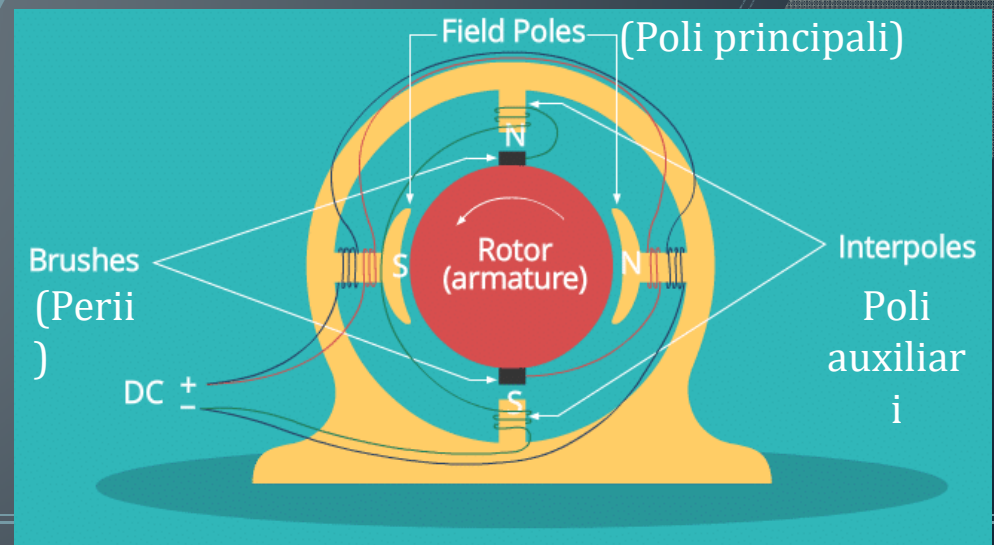
Bobine de excitație

Statorul

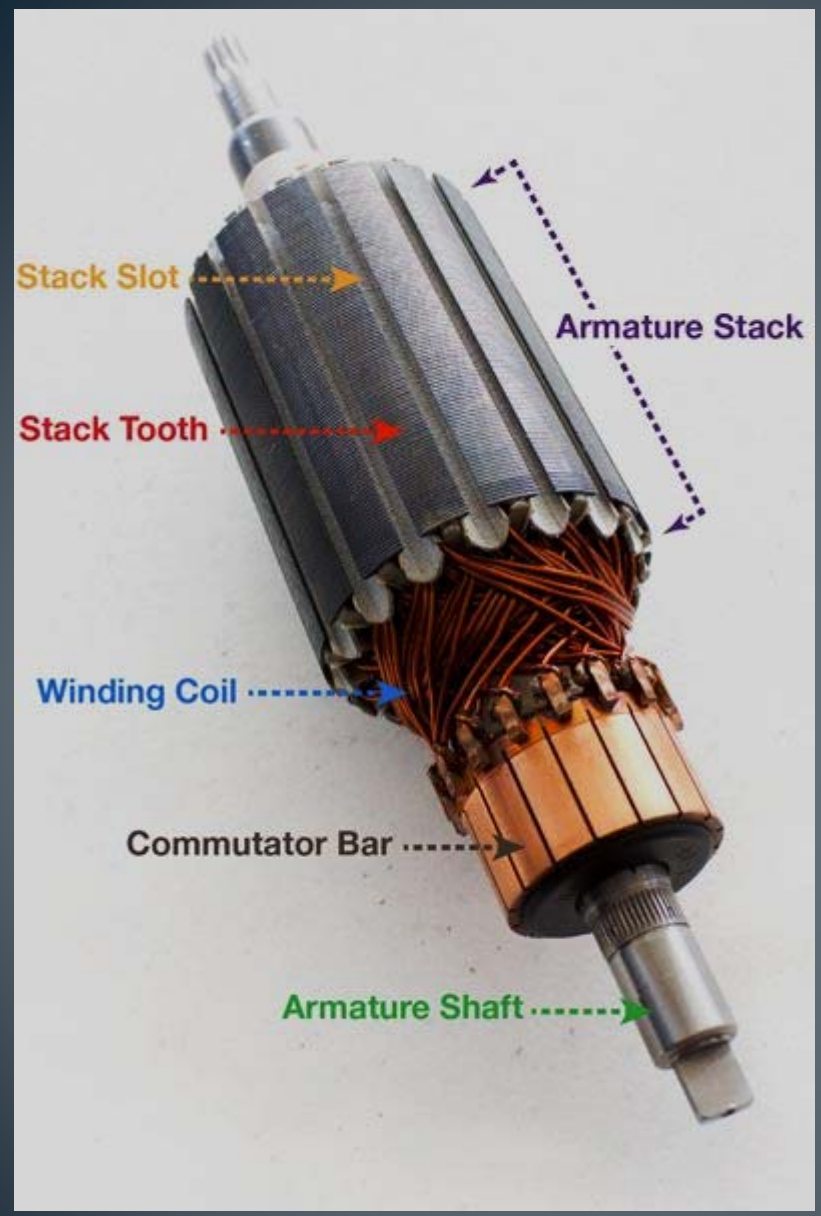


Stator de mașină de c.c. având 2 poli principali si 2 poli auxiliari

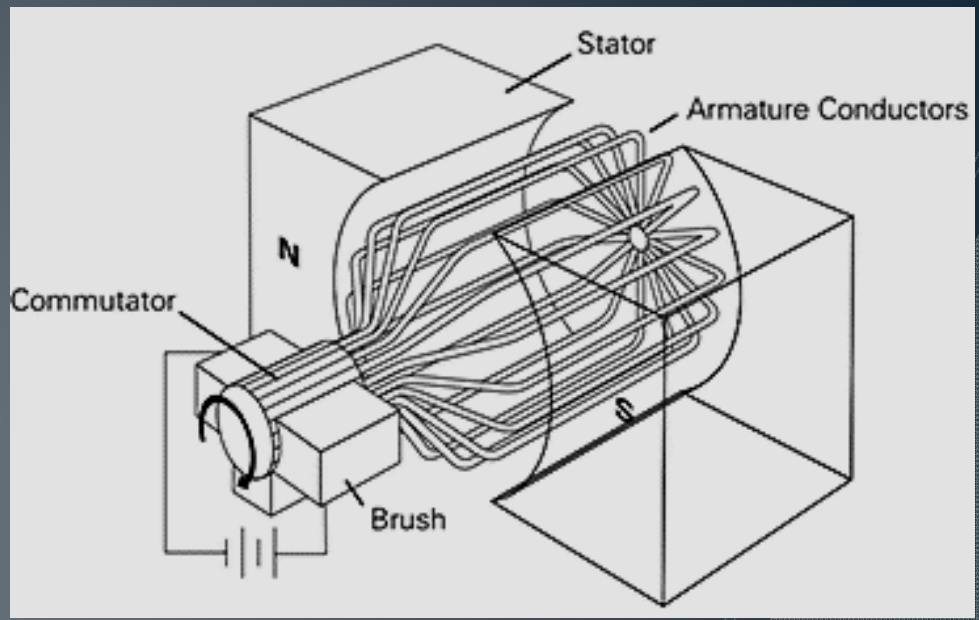
Poli auxiliari



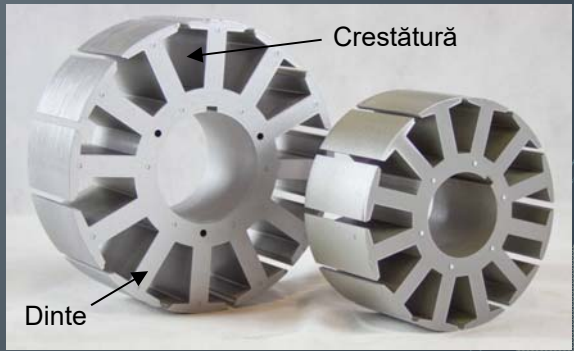
Rotorul



Ansamblu rotor



Înfășurare rotorică



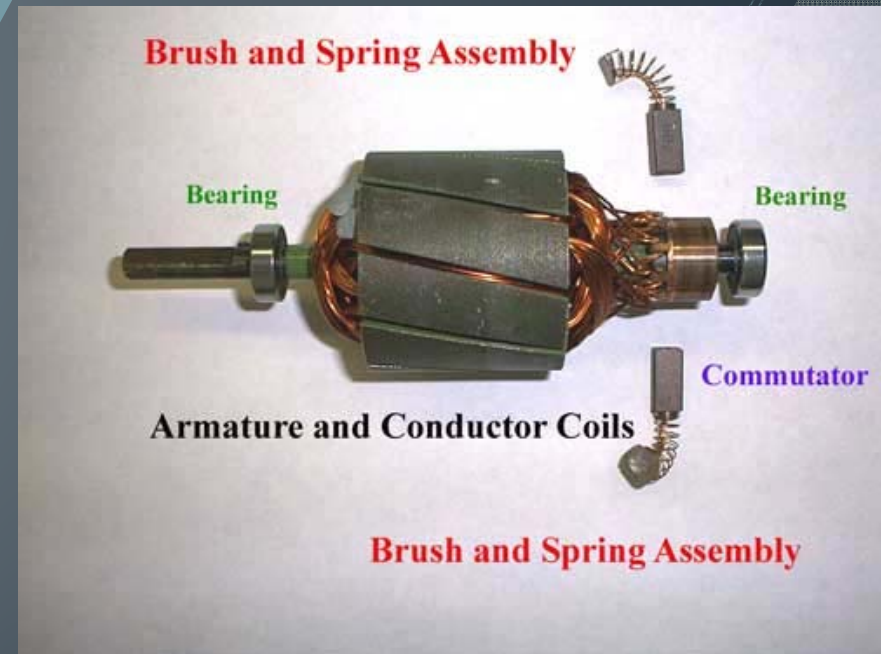
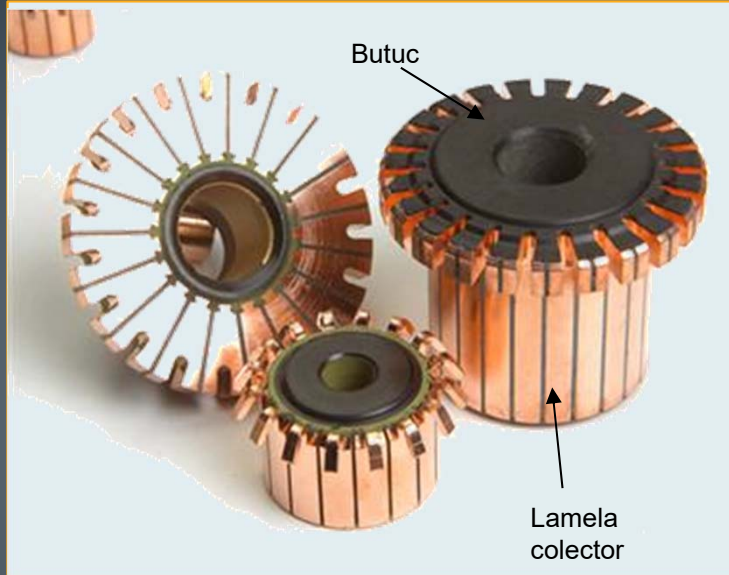
Miez rotoric

Rotorul

Rotorul este partea mobilă a mașinii de curent continuu și constituie indusul mașinii. Miezul feromagnetic al acestuia este realizat din tole de tablă silicioasă de 0,5 mm grosime, izolate între ele. La periferia tolelor rotorice sunt ștanțate creștături de diferite forme, repartizate uniform pe întreaga periferie a acestora. Tolele sunt împachetate fie direct pe axul mașinii, fie pe butucul rotorului.

Înfășurarea rotorului (indusului) este o înfășurare de tip repartizat, plasată în creștăturile rotorului. Se execută din conductor de cupru izolat cu diferite materiale, în funcție de tensiunea nominală a mașinii și de clasa de izolație a acesteia și se impregnează cu lac izolant. Capetele fiecărei bobine rotorice sunt conectate la lamelele colectorului.

Colectorul



Colectorul

Colectorul este format din lamele conductoare, executate din bandă de cupru și izolate între ele prin lamele de micanită. Lamelele sunt plasate pe un butuc și sunt izolate față de acesta.

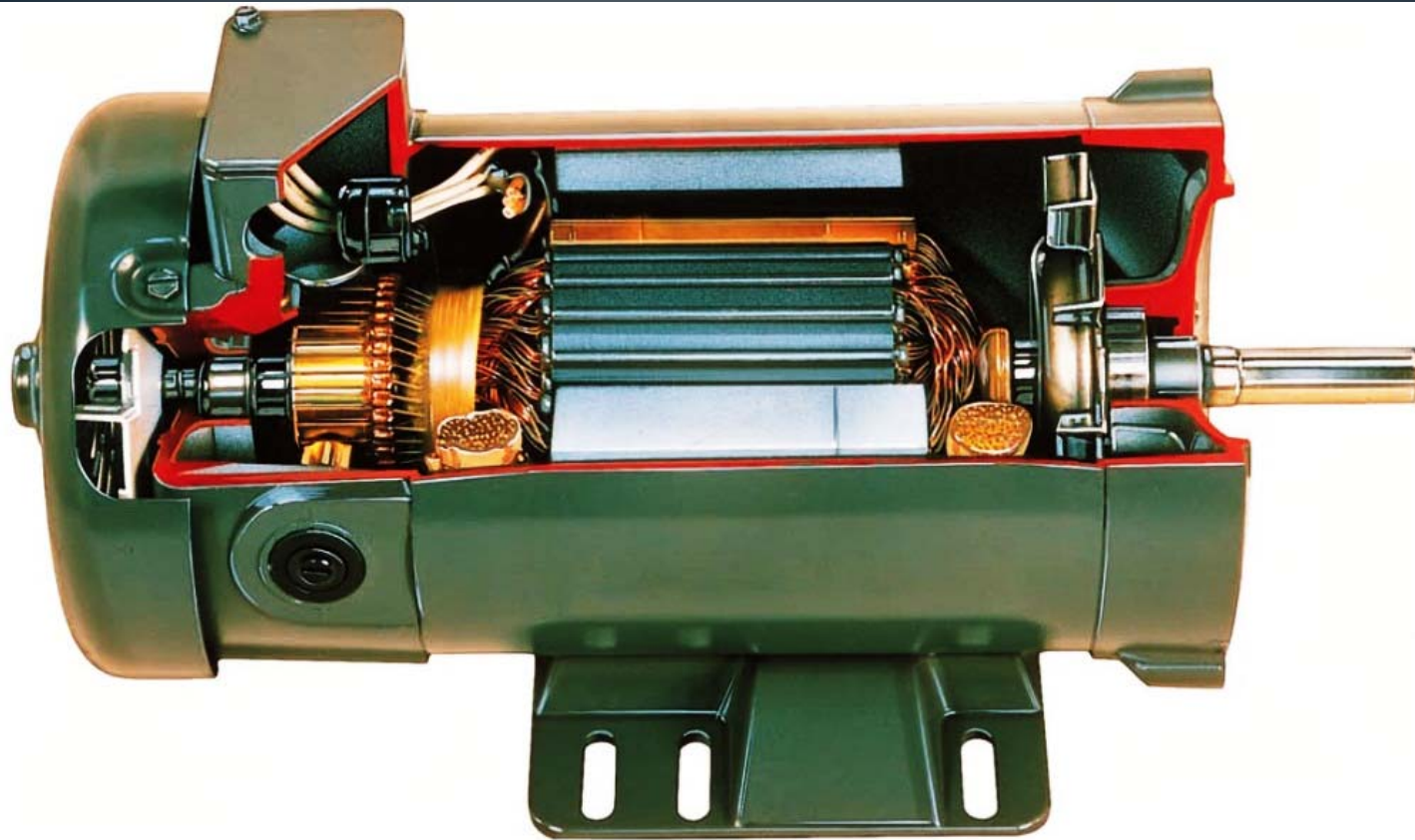
Periile

Pe lamelele colectorului calcă *periile*. Acestea sunt plasate în *portperii*. Portperiile sunt plasate cu ajutorul unor *tije portperie* pe un *colier*, care la rândul său este plasat pe scutul frontal din dreptul colectorului. Întregul sistem de susținere a periilor are rolul de a permite modificarea poziției axei periilor în raport cu axa polilor inductori.

Periile sunt confecționate în general din electrografit. La mașinile cu tensiunea nominală de până la 24 V, periile se execută din cupru grafitat.



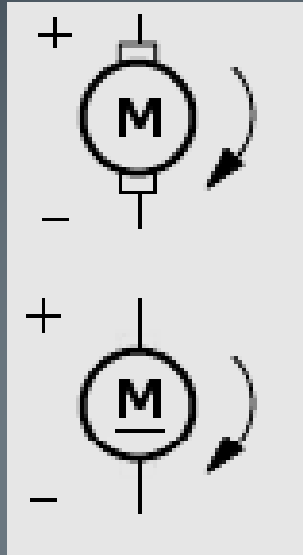
Periile împreună cu colectorul formează un sistem extrem de important în funcționarea mașinii de curent continuu: el joacă rol de redresor mecanic sau inverter mecanic.



DC motor, field structure, and armature assembly. (Courtesy Reliance Electric Co.)

Mașină de curent continuu – vedere secționată

Simbolizare

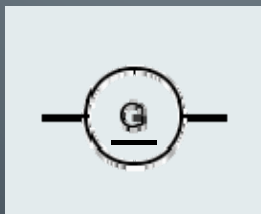


In circuitele electrice, mașina de c.c. este simbolizată ca în figurile alăturate, indicându-se eventual și regimul de funcționare: M - motor sau G - generator



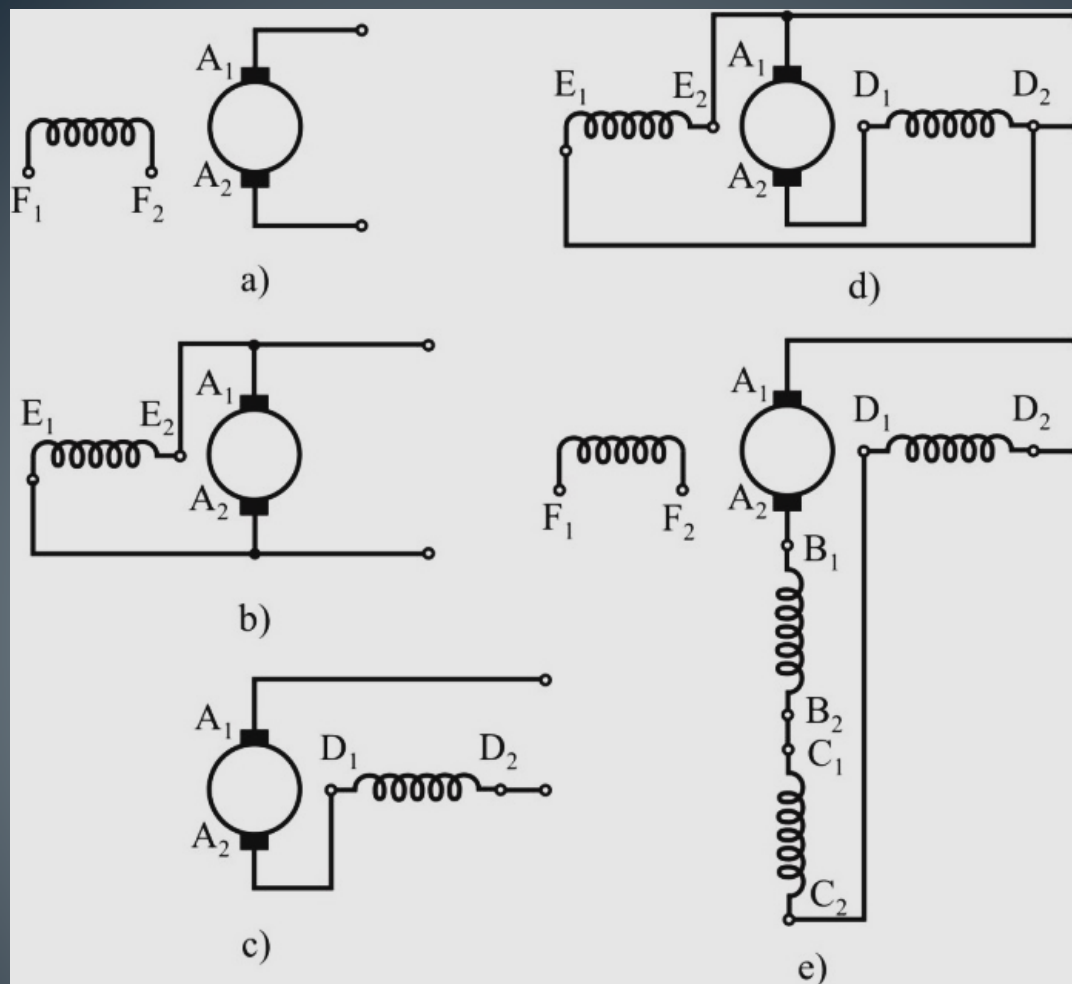
Motor – regim de funcționare în care mașina electrică absoarbe energie electrică pe la borne și furnizează energie mecanică pe la ax.

Generator - regim de funcționare în care mașina electrică absoarbe energie mecanică pe la ax și furnizează energie electrică pe la borne.



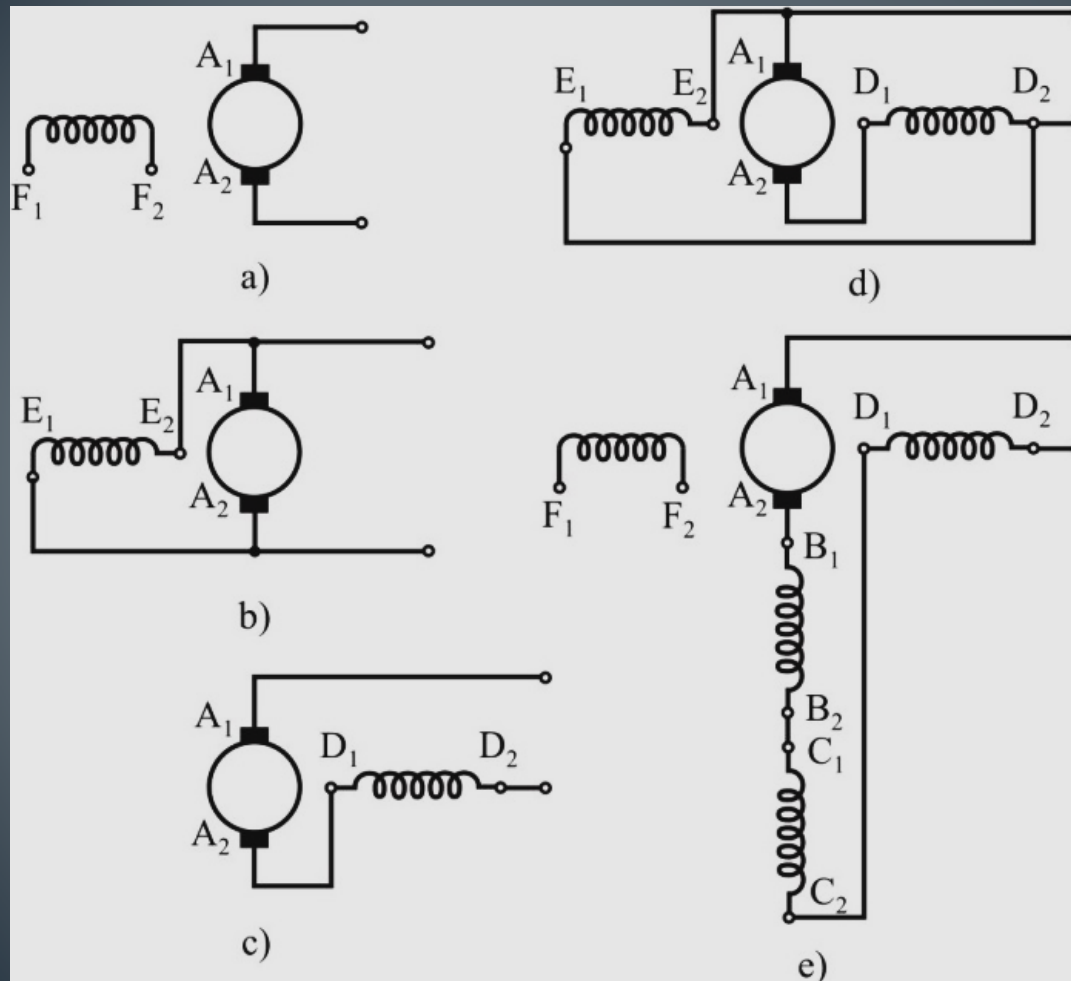
Mașina electrică = Convertor electromecanic

Clasificare



În funcție de modul în care înfășurarea de excitație (a polilor principali) este conectată față de înfășurarea rotorică, există următoarele tipuri de mașini de c.c. : a) MCC cu excitație separată; b) MCC cu excitație derivație; c) MCC cu excitație serie; d) MCC cu excitație mixtă (serie + derivație); e) MCC cu excitație mixtă (serie + separata).

Marcarea bornelor



Marcarea extremităților înfășurărilor mașinii de curent continuu este standardizată după cum urmează:

- înfășurarea rotorica (indusului):
 $A_1 - A_2$;
- înfășurarea polilor auxiliari:
 $B_1 - B_2$;
- înfășurarea de compensare:
 $C_1 - C_2$;
- înfășurarea de excitație serie:
 $D_1 - D_2$;
- înfășurarea de excitație derivație:
 $E_1 - E_2$;
- înfășurarea de excitație separată:
 $F_1 - F_2$.

De regulă, literele ce precizează tipul înfășurării sunt inscripționate la placa de borne a mașinii electrice.

Plăcuța indicatoare

TYPE		Z4-180-21	NO.		18B2011
30	kW	440	V	IP	21S
79	A	1000/2000	r/min	INS. CL	F
Excitation		180	V	DUTY	S1
Excitation		5.78	A	WGT	350 kg
Excitation type	Separately excited				
STD.	JB6316-2002		DATE 2018.07		
CHINA ELECTRIC (SHANGHAI) CO., LIMITED					
MADE IN CHINA					

Orice mașină electrică este prevăzută cu o „plăcuță indicatoare” care este fixată pe carcasă.

Pe plăcuța indicatoare sunt inscripționate datele nominale principale.

In exemplul prezentat se pot identifica următoarele date nominale:

- Este vorba despre o mașină de c.c. cu excitație separată;
- Puterea nominală este de 30 kW;
- Tensiunea de alimentare a înfășurării rotorice este de 400 V;
- Curentul nominal prin înfășurarea rotorică este de 79 A;
- Tensiunea de alimentare a înfășurării de excitație este de 180 V;
- Curentul de excitație nominal este de 5,78 A.



Mărimile nominale caracterizează funcționarea mașinii atunci când este încărcată la sarcină nominală (in cazul exemplului – 30 kW)

Cuvinte cheie:

Stator – partea fixă a mașinii electrice de c.c. ce reprezintă inductorul (cel ce creează fluxul de excitație);

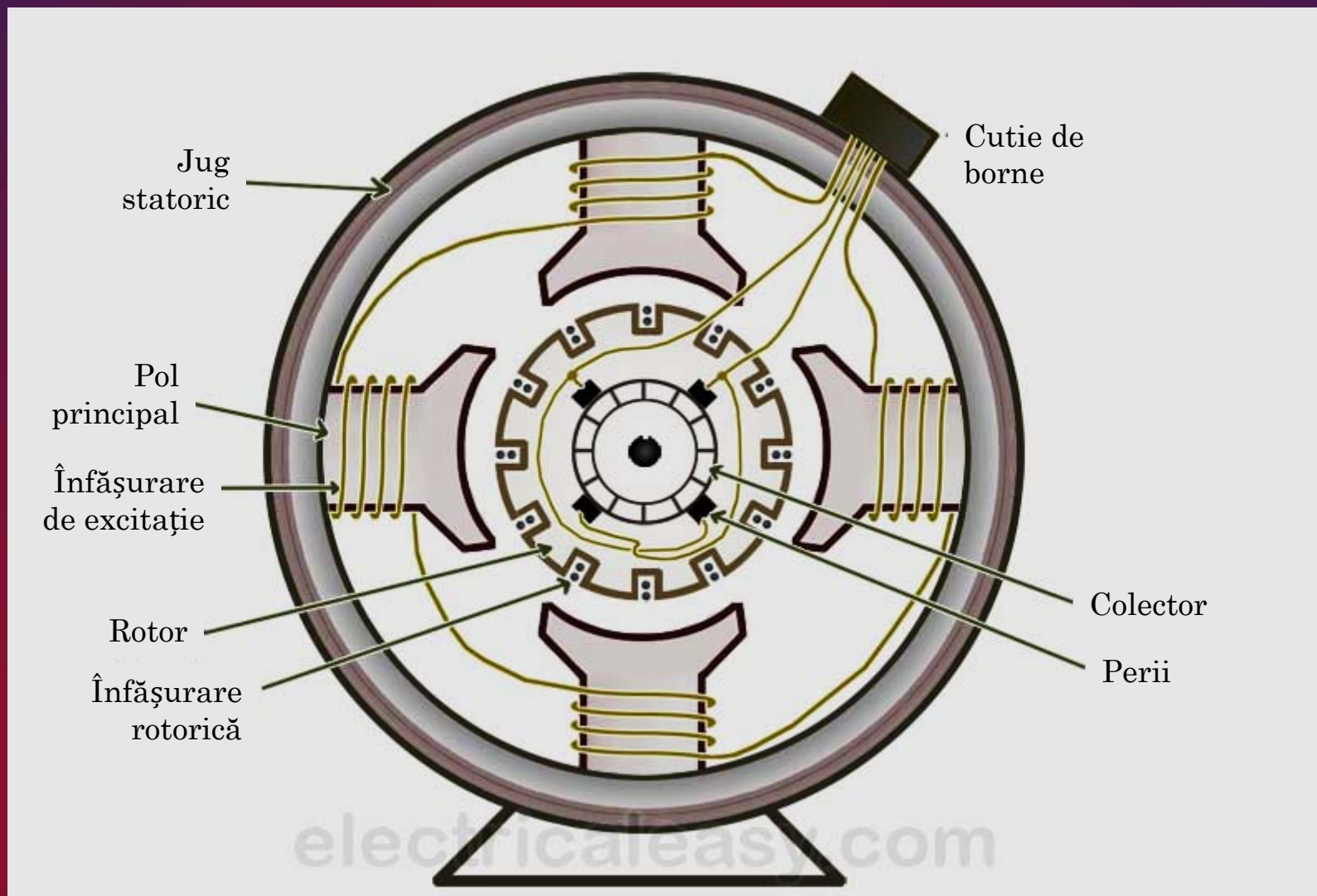
Rotor – partea mobilă a mașinii de c.c. ce reprezintă indusul (partea unde se află înfășurarea în care se induc tensiuni);

Sistem colector-perii – reprezintă redresorul mecanic sau inverterul mecanic al mașinii de c.c.

CURS 2

Principiul de funcționare a mașinii de curent continuu



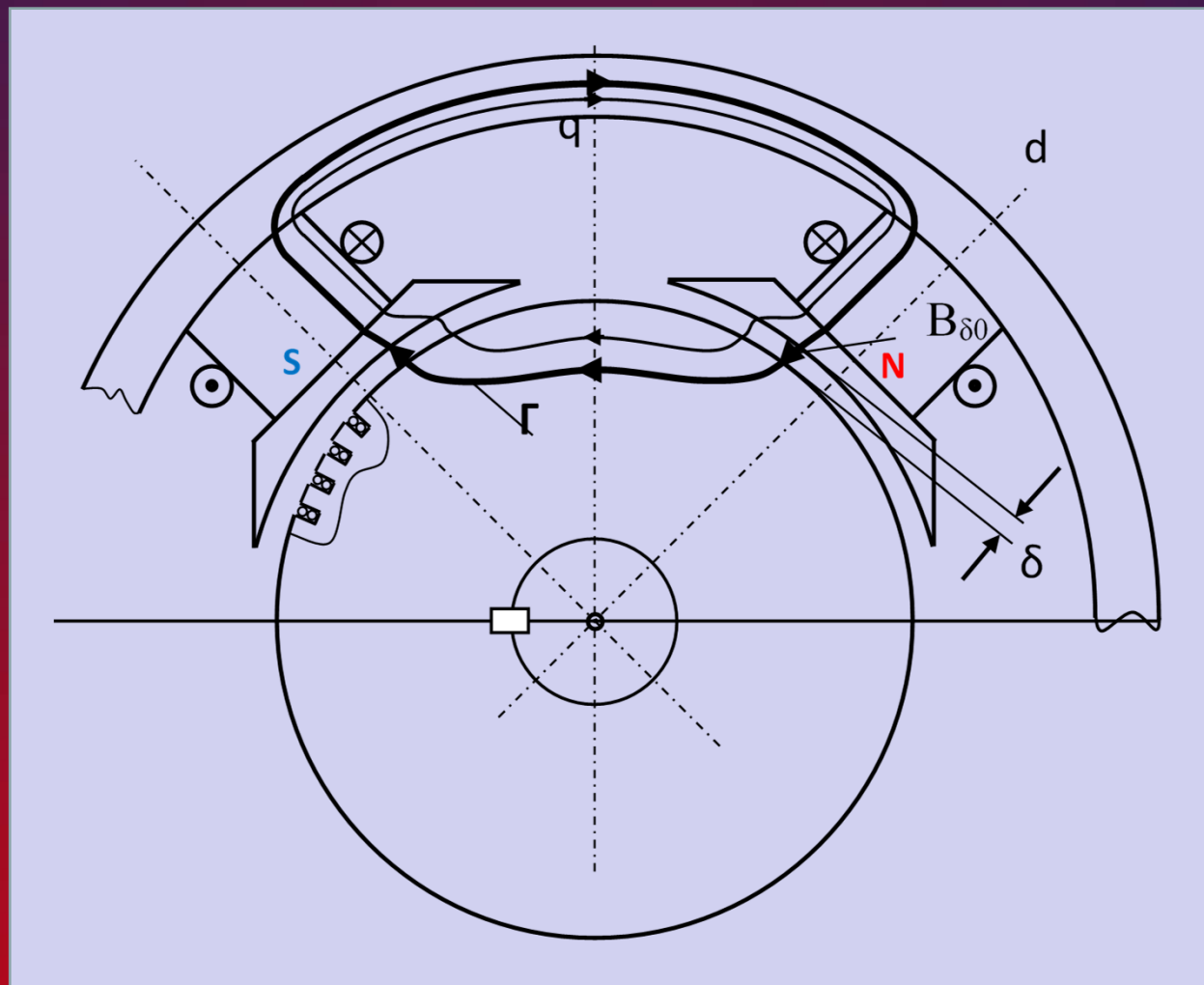


Secțiune transversală prin mașina de c.c. in construcție „minimală”

In mașina de c.c. se produc două câmpuri magnetice principale:

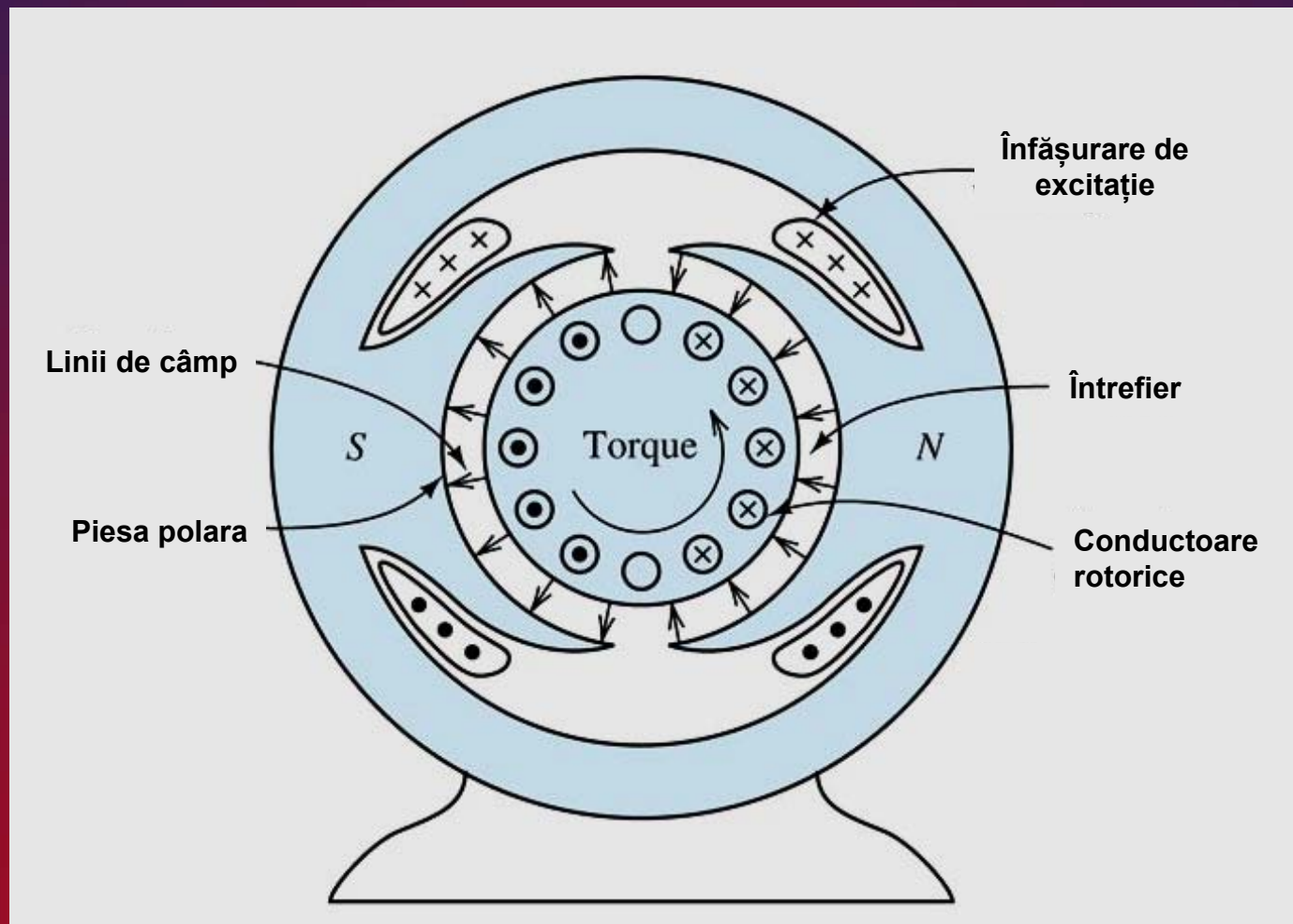
- *Câmpul magnetic inductor* : apare ca urmare a prezenței curentului de excitație prin înfășurarea plasată pe polii statorici. Câmpul magnetic inductor este câmpul principal in mașina de c.c.
- *Câmpul magnetic de reacție* : apare ca urmare a prezenței curentului prin înfășurarea rotorică. Acest câmp magnetic influențează negativ fenomenul de comutație, mai ales in mașinile fără poli auxiliari.
- Cele doua câmpuri se compun dând câmpul rezultat in mașina de c.c.



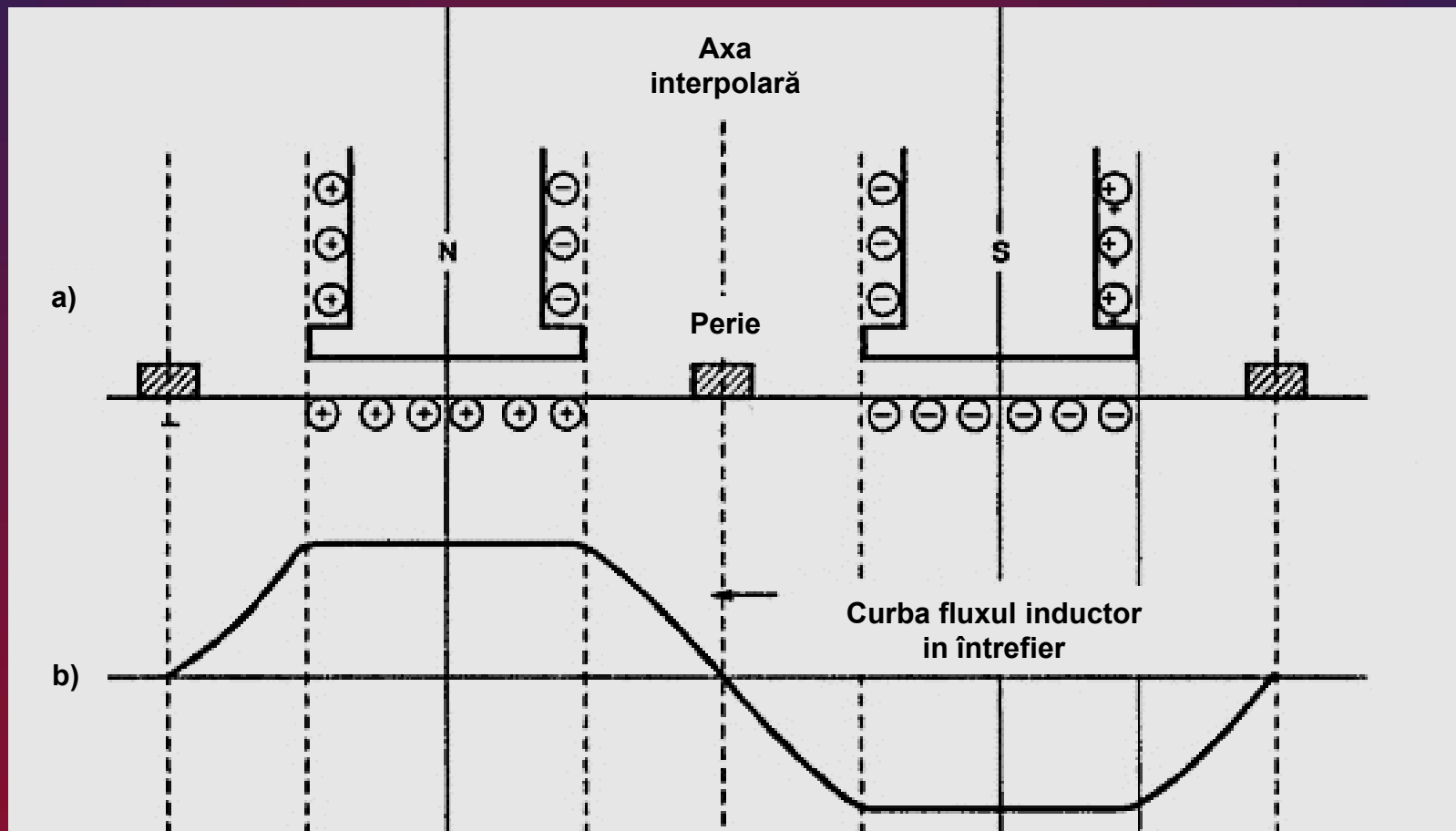


Linii câmpului magnetic inductor se închid între poli statorici vecini (care sunt de polaritate opusă) prin jugul statoric și prin rotor, traversând totodată și întrefierul (notat cu δ) prin dreptul pieselor polare ale polilor principali. Din acest motiv, toate aceste componente constructive sunt construite din material feromagnetic.

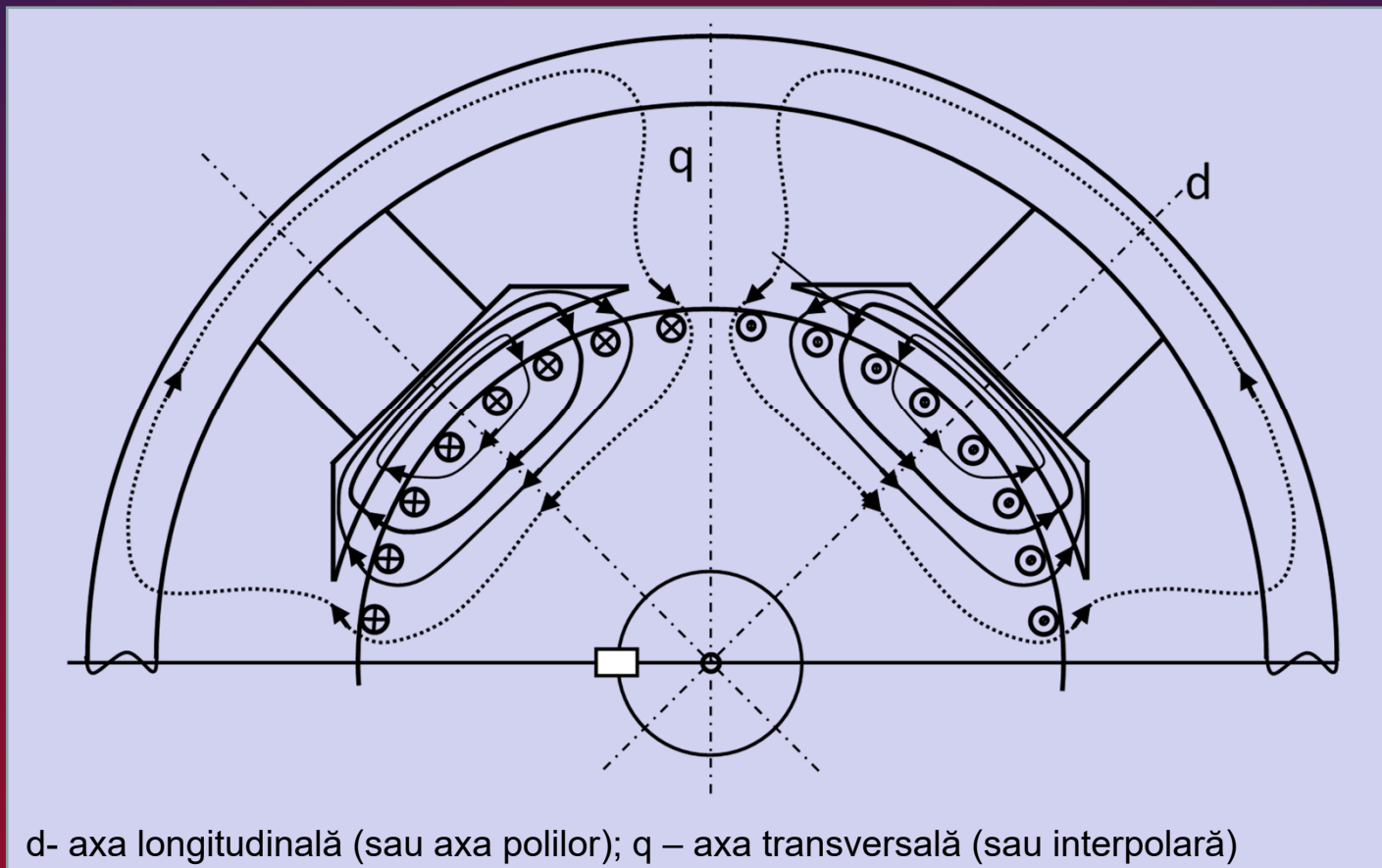
În figură este reprezentat, pentru exemplificare, un traseu notat cu Γ . Valoarea inducției în întrefier este notată cu $B_{\delta 0}$.



Se consideră că trecerea liniilor de câmp de la polii statorici către rotor și invers se face pe trasee radiale (în figură, săgețile din întrefier prezintă această situație).



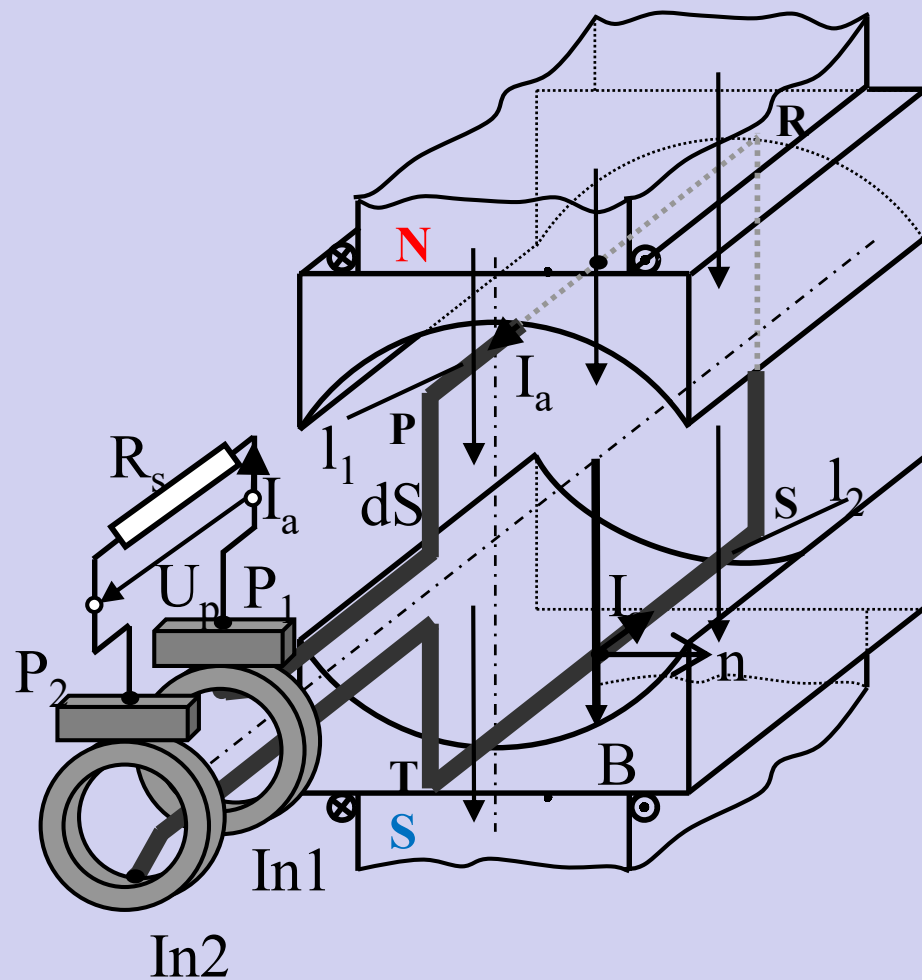
Datorită neuniformității întrefierului (care este foarte mic sub polii inductori și foarte mare între poli), variația câmpului din întrefier are o formă trapezoidală: câmpul are o valoare maximă constantă în dreptul polilor și scade practic spre zero în axele interpolare.



Câmpul magnetic de reacție este creat de înfășurarea rotorică. Liniile de câmp se închid prin piesele polare ale polilor principali, rotor și întrefier. Practic, liniile câmpului de reacție au un traseu transversal față de cele ale câmpului inductor (liniile câmpului inductor se închid de-a lungul axei polilor, axă ce este notată cu d și se numește axa longitudinală, iar liniile câmpului de reacție sunt în principal perpendiculare pe această axă).

Producerea energiei electrice

Fig. 1



a) $t = 0$

Se consideră o structură electromagnetică formată din următoarele componente:

- Doi poli magnetici de polaritate opusă, N și S. Aceștia reprezintă două piese feromagnetice pe care este plasată câte o înfășurare parcursă de curent continuu. Sensul curentului (vezi conductoarele) determină polaritatea polilor. Sensul liniilor de câmp, respectiv polaritatea polilor, se determină cu *regula mâinii drepte*. Câmpul creat de cei doi poli este caracterizat de inducția B , ai cărui vectori, pe fig.1, sunt verticali.
- O spirală realizată din material conductor (de regula Cu). Spira are două laturi (l_1 și l_2) notate cu PR respectiv ST. Laturile spirei se găsesc între cei doi poli magnetici. Cele două capete ale spirei sunt conectate la două inele notate In1 și In2. Spira se rotește în interiorul polilor cu o viteză constantă, v . Sensul de rotație este sensul trigonometric (indicat de săgeată).
- Două perii din material conductor (de regulă grafit) notate cu P_1 și P_2 . Aceste perii sunt în contact cu inelele omoloage (calcă pe inele).
- O rezistență de sarcină, R_s , care practic închide circuitul electric format din spira, inele și perii.

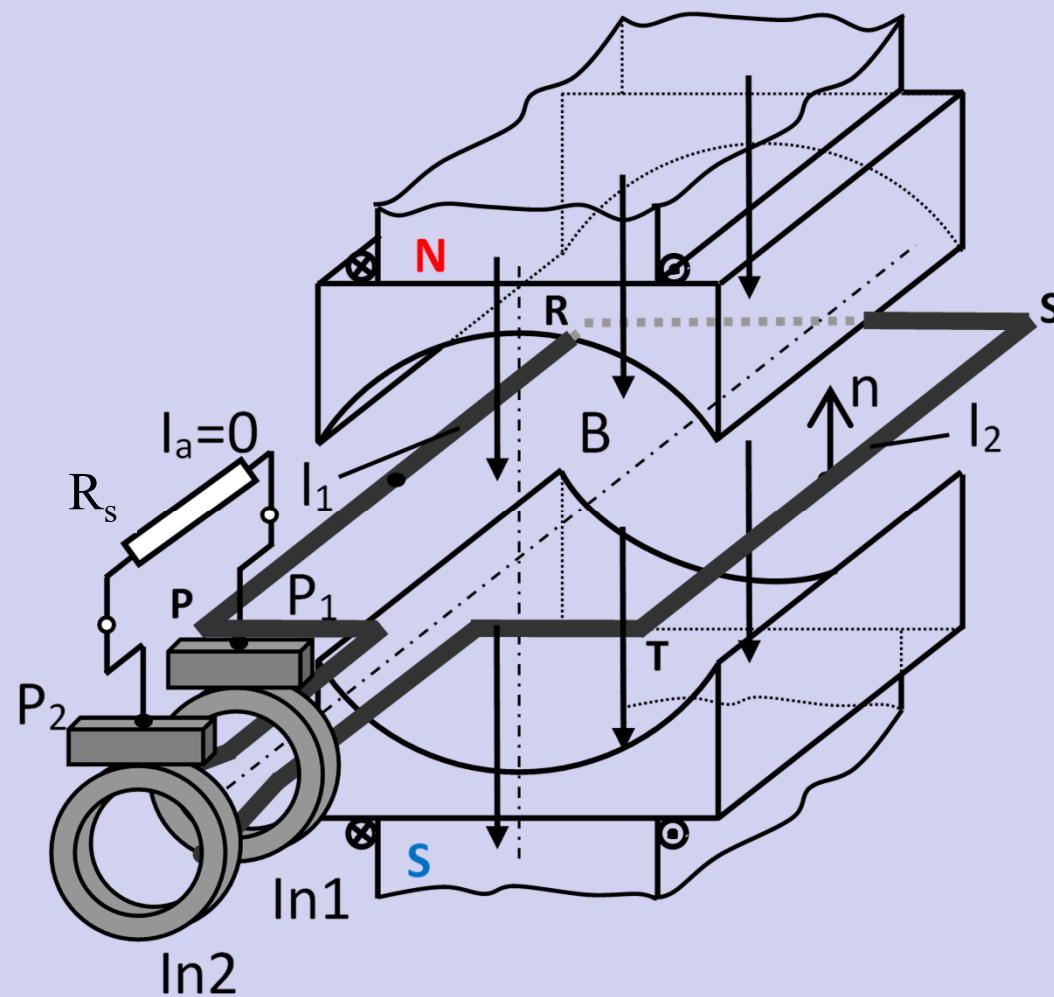
Câmpul creat de cei doi poli este un câmp de amplitudine constantă și fix în spațiu (întrucât este creat de înfășurări parcurse de curent continuu). Dacă spira aflată în acest câmp este imobilă, din punct de vedere electromagnetic NU se va întâmpla nimic. Dacă însă spira se rotește în acest câmp, întrucât apare o mișcare relativă între un câmp magnetic și o spirală conductoare, se va induce o tensiune în spirală conform legii inducției electromagnetice. Această tensiune se poate măsura la capetele spirei sau la perii și este notată cu U_p .

În fig.1 este surprins momentul în care planul spirei este paralel cu planul de închidere a liniilor de câmp (în figură este vertical) și este notat ca momentul $t = 0$. În acest moment, cele două laturi ale spirei se găsesc chiar în axul polilor respectiv, în mișcarea lor de rotație, intersectează numărul maxim de linii de câmp. Drept urmare, tensiunea indusă în spirală are în acest moment valoare maximă.

Întrucât rezistența de sarcină, R_s , închide circuitul electric al spirei, prezența tensiunii induse determină apariția unui curent electric. Sensul curentului electric prin cele două laturi ale spirei se determină cu regula mâinii drepte.

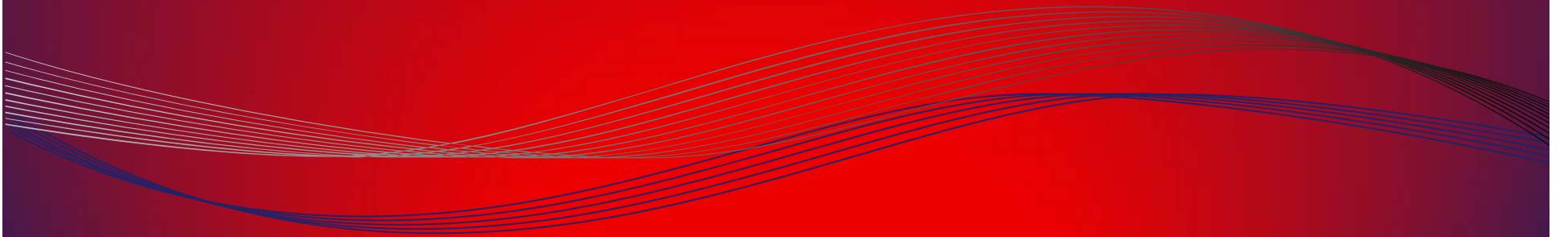
Producerea energiei electrice

Fig. 2



b) $t = T/4$

In fig.2 este prezentat momentul in care spira a efectuat un sfert de rotație, $t=T/4$. Pe măsura ce spira s-a rotit de la poziția inițial considerată spre poziția actuală, numărul de linii de câmp intersectate de laturile spirei s-a micșorat progresiv astfel încât, tensiunea indusă in spiră a scăzut. La acest moment, când planul spirei este perpendicular pe planul liniilor de câmp, tensiunea indusă este zero. Drept urmare, curentul prin spiră este, de asemenea, zero.



Următorul moment luat în discuție, fig.3, coincide cu poziția spirei care s-a rotit în continuare cu încă un sfert de rotație. Planul spirei a devenit din nou paralel cu planul liniilor de câmp iar tensiunea indusă în laturile spirei este din nou maximă. Practic, de la poziția din fig.2 și până la cea din fig.3, tensiunea indusă în spirală a crescut de la zero la valoarea maximă.

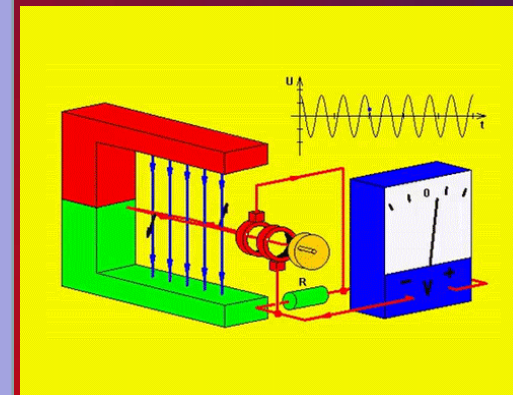
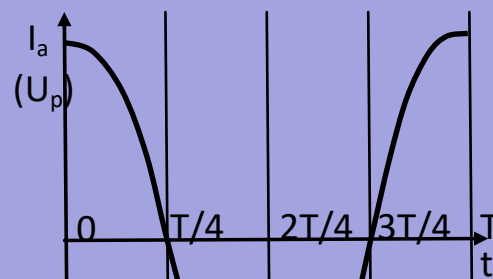
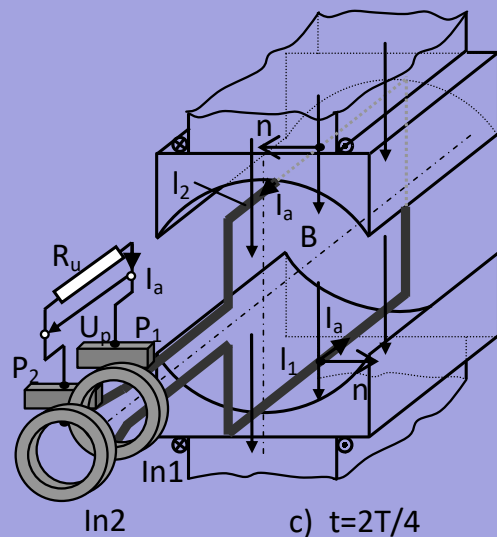
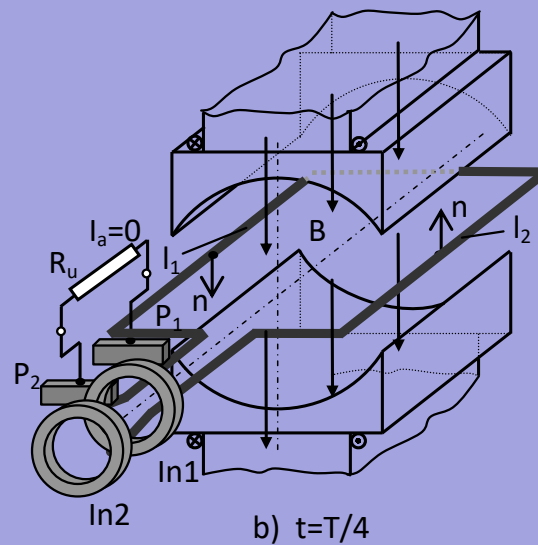
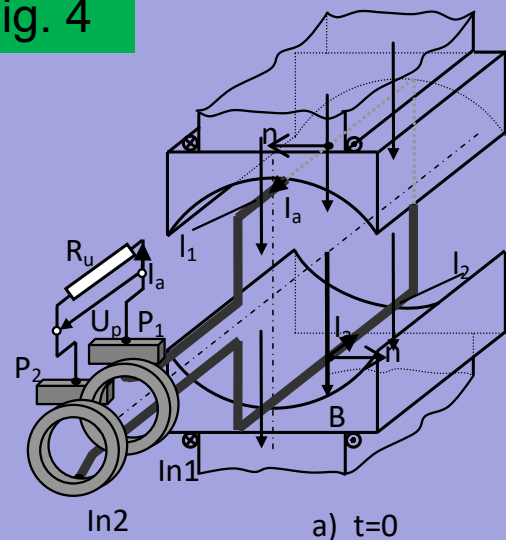
Însă, pentru poziția din fig.3, laturile spirei sunt plasate diferit față de situația din fig.1: latura l_1 este în vecinătatea polului S iar latura l_2 în vecinătatea polului N. Sensul tensiunilor induse și al curenților se determină cu aceeași regulă a mâinii drepte, însă, se poate vedea că, spre deosebire de situația din fig.1, sensul curenților prin cele două laturi s-a inversat. Inițial, în latura l_1 , sensul curentului era de la R la P iar după jumătate de rotație a spirei (fig.3) sensul curentului este de la P la R. Drept urmare, sensul curentului prin sarcina R_s , s-a inversat.

Rotirea spirei cu încă un sfert de rotație (nefigurată) duce spira într-o poziție asemănătoare cu cea din fig.2, deci tensiunea indusă scade până la valoarea zero.

Încheierea unei rotații complete a spirei, o aduce în poziția inițială, prezentată în fig.1. În acest ultim sfert de rotație, tensiunea crește din nou de la zero la valoarea maximă.

Producerea energiei electrice

Fig. 4



Rotirea spirei in câmpul creat de polii electromagnetici determină inducerea unei tensiuni ALTERNATIVE in laturile spirei. De asemenea, curentul prin laturile spirei dar si prin rezistența de sarcină este ALTERNATIV.

In fig.4d este reprezentată variația curentului dar si a tensiunii induse, care au o formă sinusoidală.

Pentru că structura aleasă are **2** poli, atunci pentru fiecare rotație completă a spirei, variația mărimilor electrice (tensiune indusă si curent electric) corespunde unei perioade T . Dacă structura ar fi avut **4** poli, atunci la fiecare rotație, mărimilor electrice le-ar fi corespuns două perioade (s.a.m.d.)

Structura prezentată reprezintă un *generator electric de curent alternativ*.



In fig.5 se consideră aceeași structură electromagnetică la care însă apare o modificare importantă: cele două inele sunt înlocuite de două semi-inele S_1 și S_2 . Capătul laturii ℓ_1 este conectat la semi-inelul S_1 , iar capătul laturii ℓ_2 la semi-inelul S_2 . Peria P_1 calcă pe semi-inelul S_1 iar peria P_2 calcă pe semi-inelul S_2 .

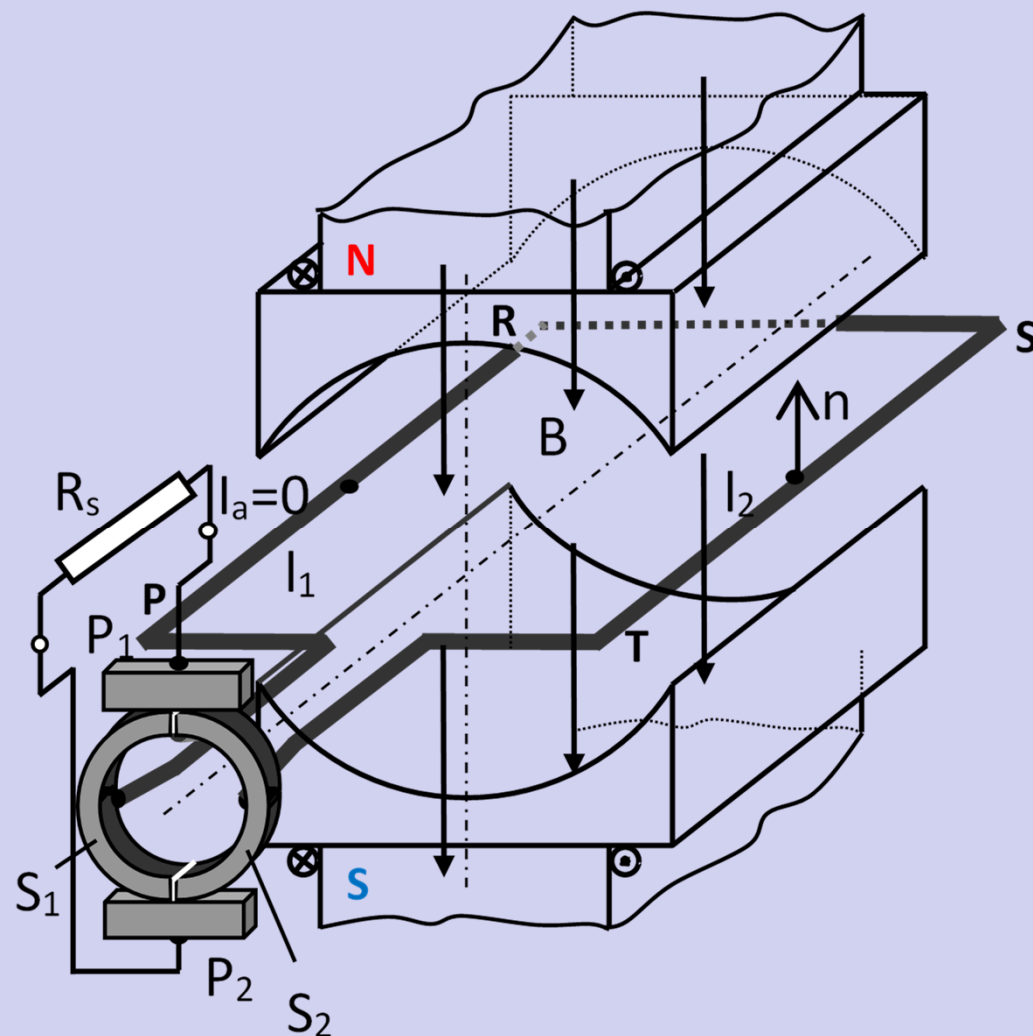
Situația prezentată in fig.5 este similară cu cea din fig.1. Spira, care se rotește in sens trigonometric, se află la momentul $t = 0$ in poziția figurată. Planul spirei este paralel cu liniile câmpului produs de polii electromagnetici și, in mișcarea ei de rotație, intersectează un număr maxim de linii de câmp .

Conform legii inducției electromagnetice, se induce in laturile spirei tensiuni și apare un curent al căror sens este dat de *regula mâinii drepte*. Curentul circulă de la R către P in latura ℓ_1 și de la T către S in latura ℓ_2 . Valoarea tensiunilor induse și a curentului este maximă.



Principiul de funcționare in regim de generator

Fig. 6



b) $t = T/4$

In fig.6 spira a efectuat un sfert de rotație, $t=T/4$. Se observă că, odată cu spira s-au rotit și cele două semi-inele. Pentru momentul prezentat, periile P_1 și P_2 scurt-circuetează cele două laturi, adică spira este în *scurt-circuit*.

De la momentul $t=0$ la $t=T/4$, tensiunea indusă a scăzut de la valoarea maximă la zero. Întrucât tensiunea indusă este zero, și curentul prin spira este zero, deci scurtcircuitarea spirei nu are nici un efect asupra ei.



În fig.7 spira s-a rotit cu jumătate de rotație față de situația inițială și laturile ei ocupă pozițiile din dreptul axei polilor electromagnetici. Tensiunile induse sunt din nou maxime, ca și curentul care circulă prin laturile spirei.

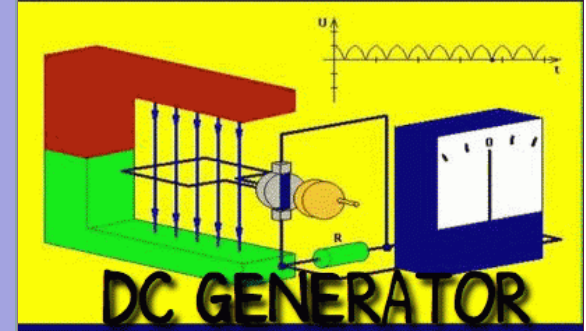
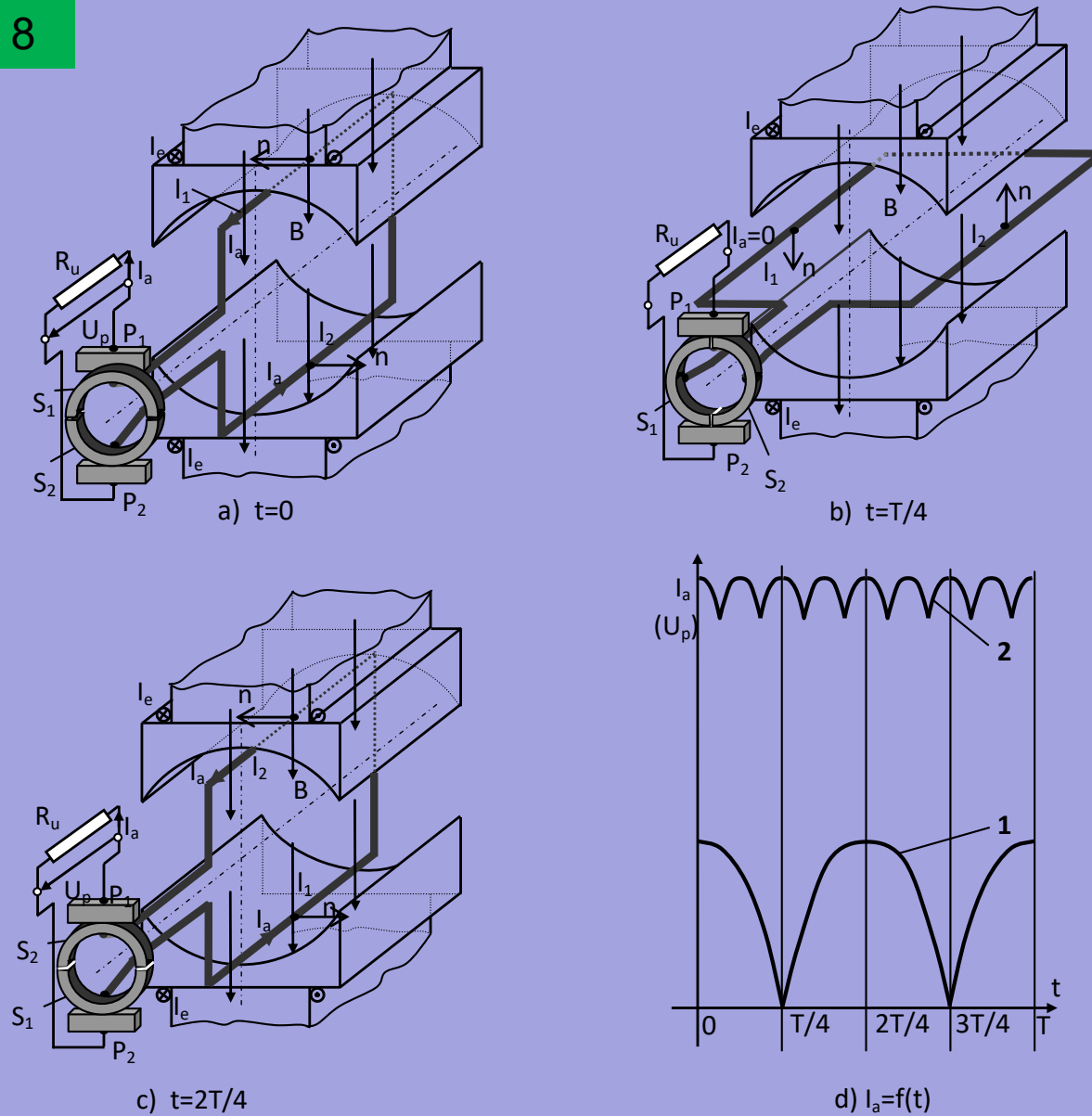
Întrucât laturile spirei și-au schimbat poziția față de situația din fig.5 (latura l_1 este în vecinătatea polului S iar latura l_2 în vecinătatea polului N), sensul tensiunii induse și al curentului s-au inversat.

Însă, odată cu rotirea spirei și a semi-inelelor, în acest moment, peria P_1 calcă pe semi-inelul S_2 iar peria P_2 calcă pe semi-inelul S_1 . Drept urmare, sensul curentului prin sarcina R_s NU s-a modificat.

Pentru următoarele două poziții intermediare care încheie o rotație completă a spirei, fenomenele se petrec similar cu cele descrise anterior.

Principiul de funcționare in regim de generator

Fig. 8



Pentru noua structură la care inelele au fost înlocuite cu semi-inele, fenomenele electromagnetice NU se modifică în ceea ce privește spira: tensiunea indusă cât și curentul care circulă prin spirală rămân ALTERNATIVE.

Modificarea esențială apare în circuitul exterior, reprezentat de rezistența de sarcină R_s . Aici, pe toată durata rotirii spirei, curentul își păstrează sensul. În fig.8d, curba 1 indică acest lucru. Practic, curba sinusoidală din fig.4d „este redresată”. „Redresorul” este reprezentat de cele două semi-inele împreună cu cele două perii. Se poate vorbi de cel mai simplu „redresor mecanic”.

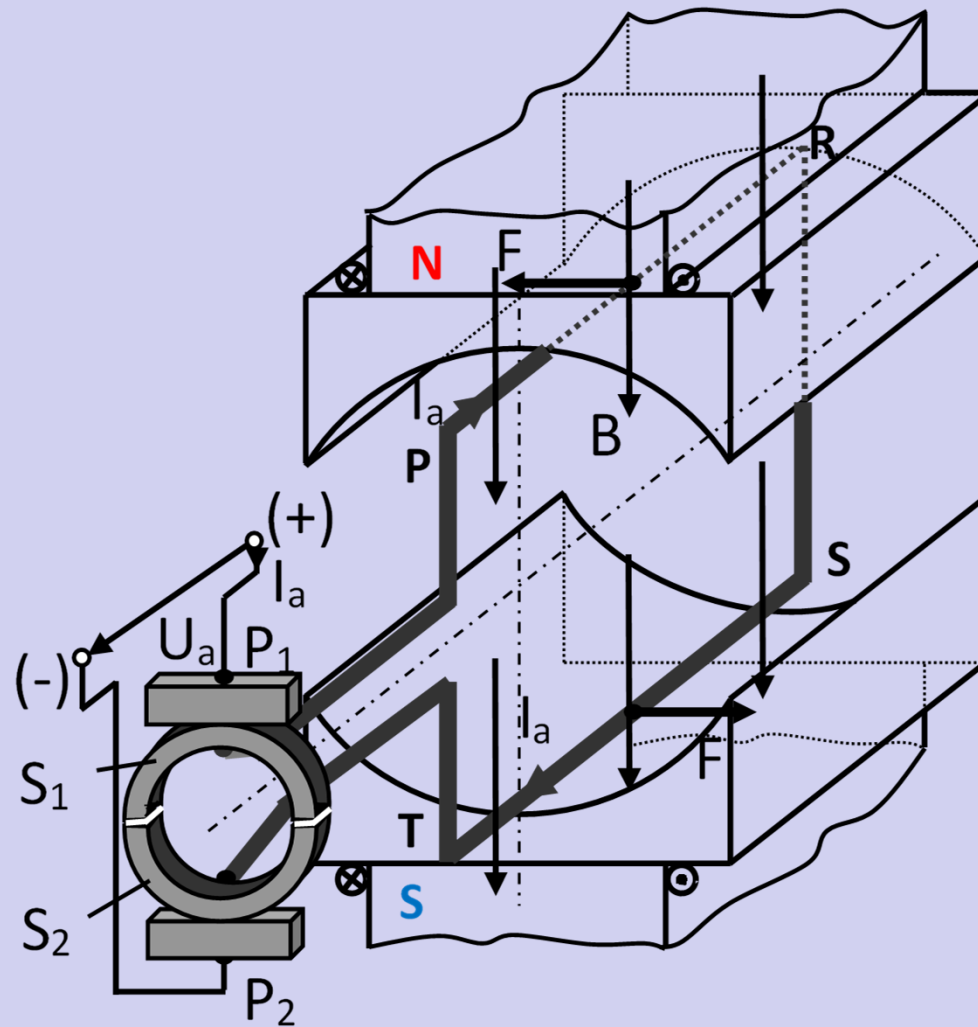
În construcția mașinilor electrice de c.c., numărul de spire și de semi-inele este mult mai mare. Ca urmare, redresarea curentului determină o curbă (curba 2 din fig.8d) ale cărei variații de amplitudine sunt mult diminuate astfel încât, curentul prin circuitul exterior poate fi considerat un *curent continuu* (Atenție, nu este același tip de curent pe care îl poate furniza un acumulator, de exemplu).

Semi-inelele devin, în realitate, lamele de colector care formează subansamblul numit colector. Cu cât numărul de lamele este mai mare cu atât variațiile de amplitudine ale curentului (și tensiunii la borne) sunt mai mici.

Structura prezentată reprezintă un *generator electric de curent continuu*.

Principiul de funcționare in regim de motor

Fig. 9



a) $t = 0$

Pentru a funcționa în regim de motor, structura prezentată în fig.9 înlocuiește în circuitul exterior rezistența de sarcină cu o sursă de alimentare de *tensiune continuă*, notată cu U_a . Astfel, prin intermediul sistemului perii-inele, spira este alimentată și parcursă de curent. În cazul prezentat în figură, curentul I_a parcurge latura l_1 de la P la R și latura l_2 de la S la T (sensul curentului este determinat de polaritatea tensiunii U_a).

Poli electromagnetici creează câmpul magnetic caracterizat de inducția B (pe figură liniile de câmp se închid vertical între cei doi poli). Pentru a crea acest câmp, poli electromagnetici sunt și ei alimentați în curent continuu.

Întrucât orice conductor parcurs de curent și aflat într-un câmp magnetic este supus unei forțe (forța Laplace), rezultă că asupra laturilor l_1 și l_2 acționează forța F având sensul dat de *regula mâinii stângi*. Cele două forțe determină rotirea spirei în sens trigonometric.

Pentru poziția din fig.9 (planul spirei este paralel cu liniile de câmp) valoarea forței este maximă.

Odată cu rotirea spirei, forța Laplace scade, iar în poziția din fig.10, valoarea forței devine zero.

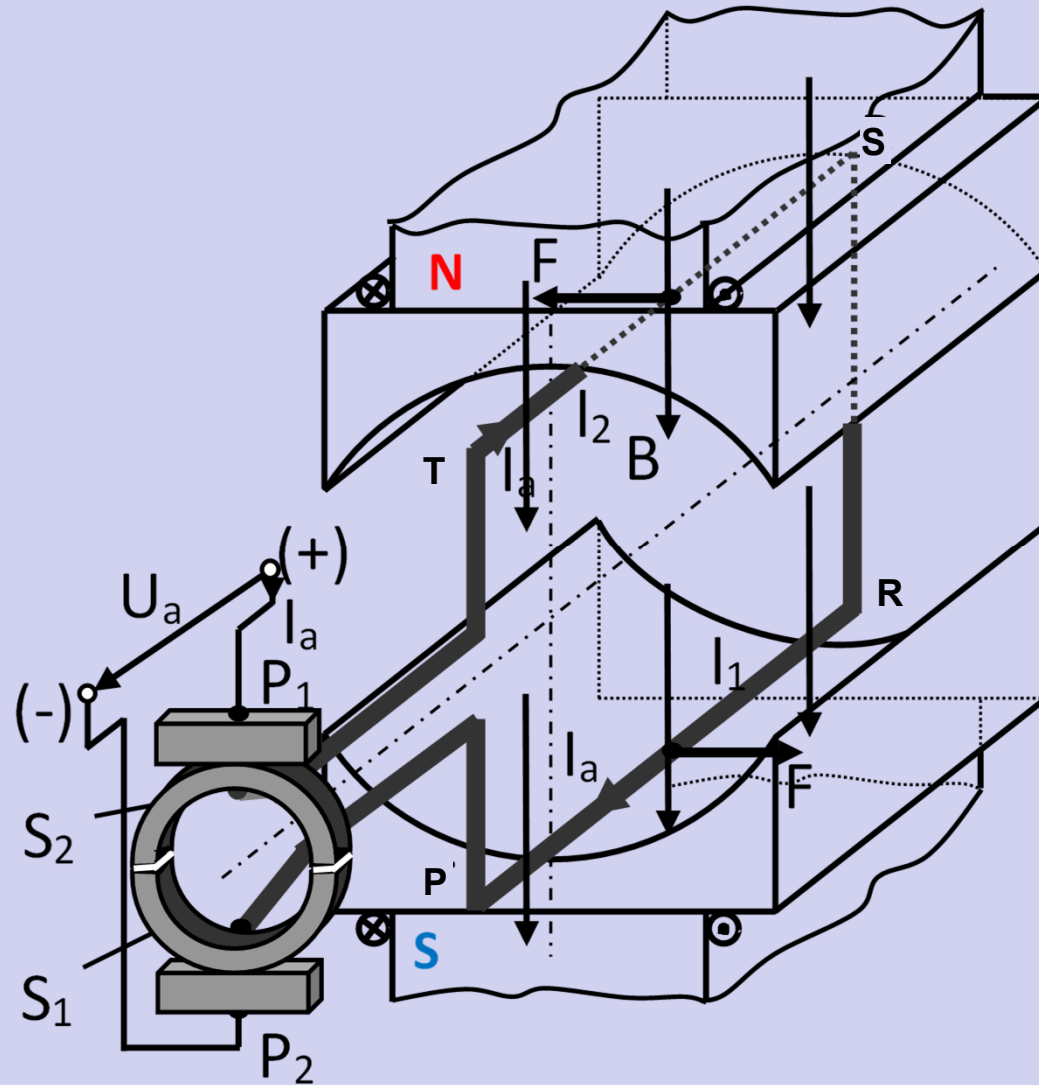
Tot în această poziție perile scurt-circuetează cele două semi-inele. În mod ideal, curentul prin spirală devine zero.

Acceptăm ideea că rotirea spirei nu se oprește în această poziție datorită existenței unei anumite inerții.



Principiul de funcționare in regim de motor

Fig. 11



c) $t = 2T/4$

Trecerea spirei in al doilea sfert de rotație determină reapariția curentului I_a . Acesta are sens schimbat prin cele doua laturi față de situația din fig.9. Drept urmare, forța Laplace are aceeași direcție și spira se poate roti in același sens.

Trebuie remarcat faptul că, deși tensiunea de alimentare a spirei este continuă, curentul prin spiră este ALTERNATIV. In regim de motor, ansamblul perii-lamele de colector joaca rol de *invertor mecanic* .

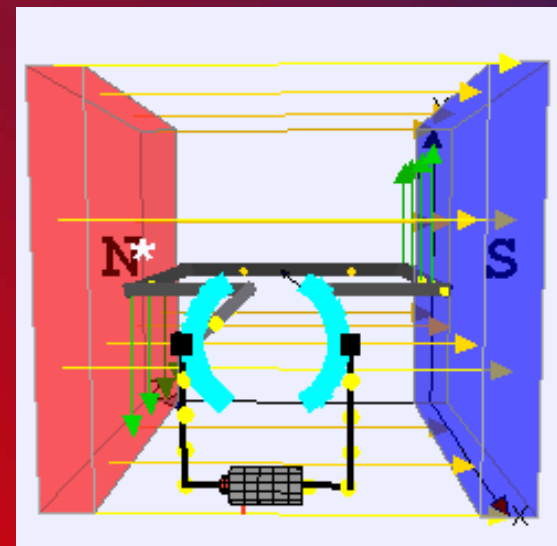
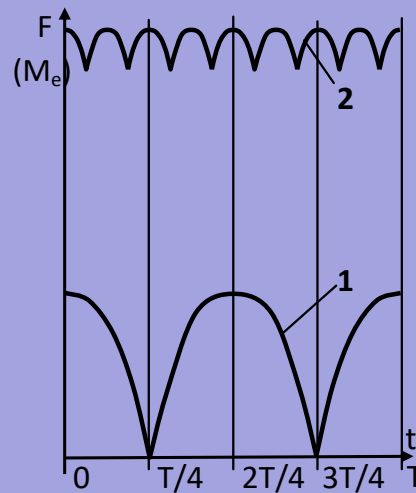
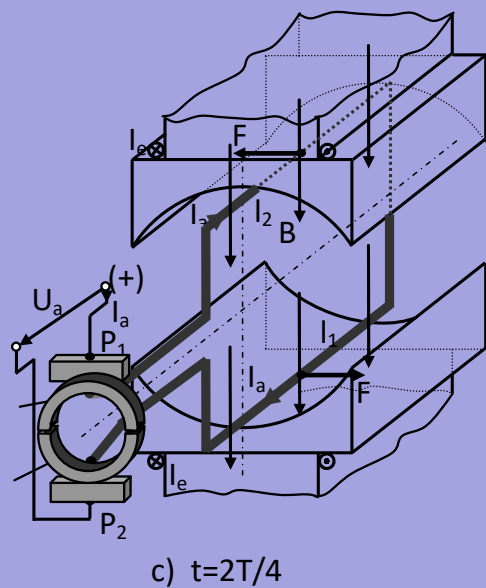
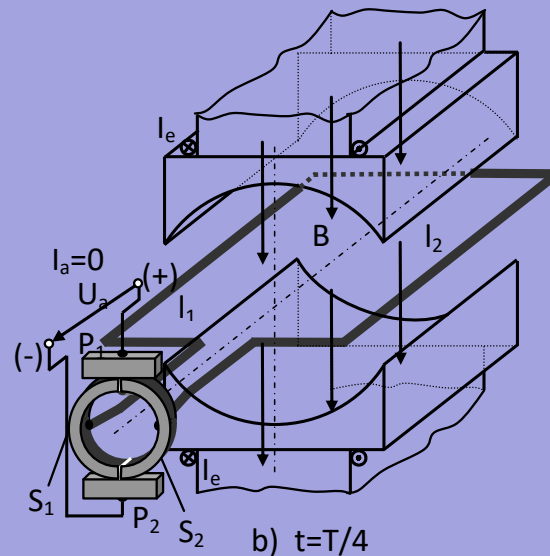
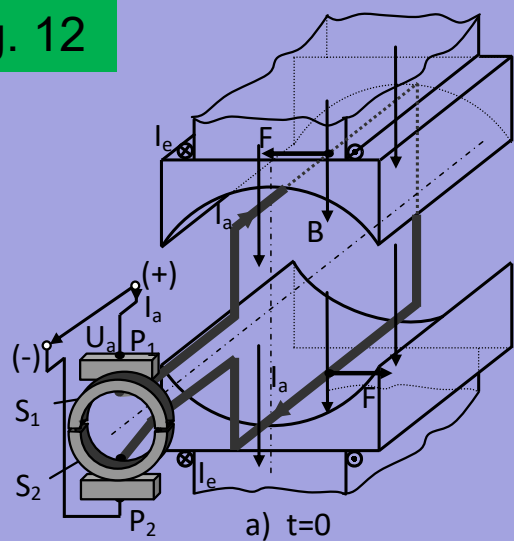
Amplitudinea forței crește și devine maximă atunci când planul spirei este paralel cu direcția liniilor de câmp.

Următoarele două sferturi de rotație respectă observațiile făcute până aici.



Principiul de funcționare in regim de motor

Fig. 12



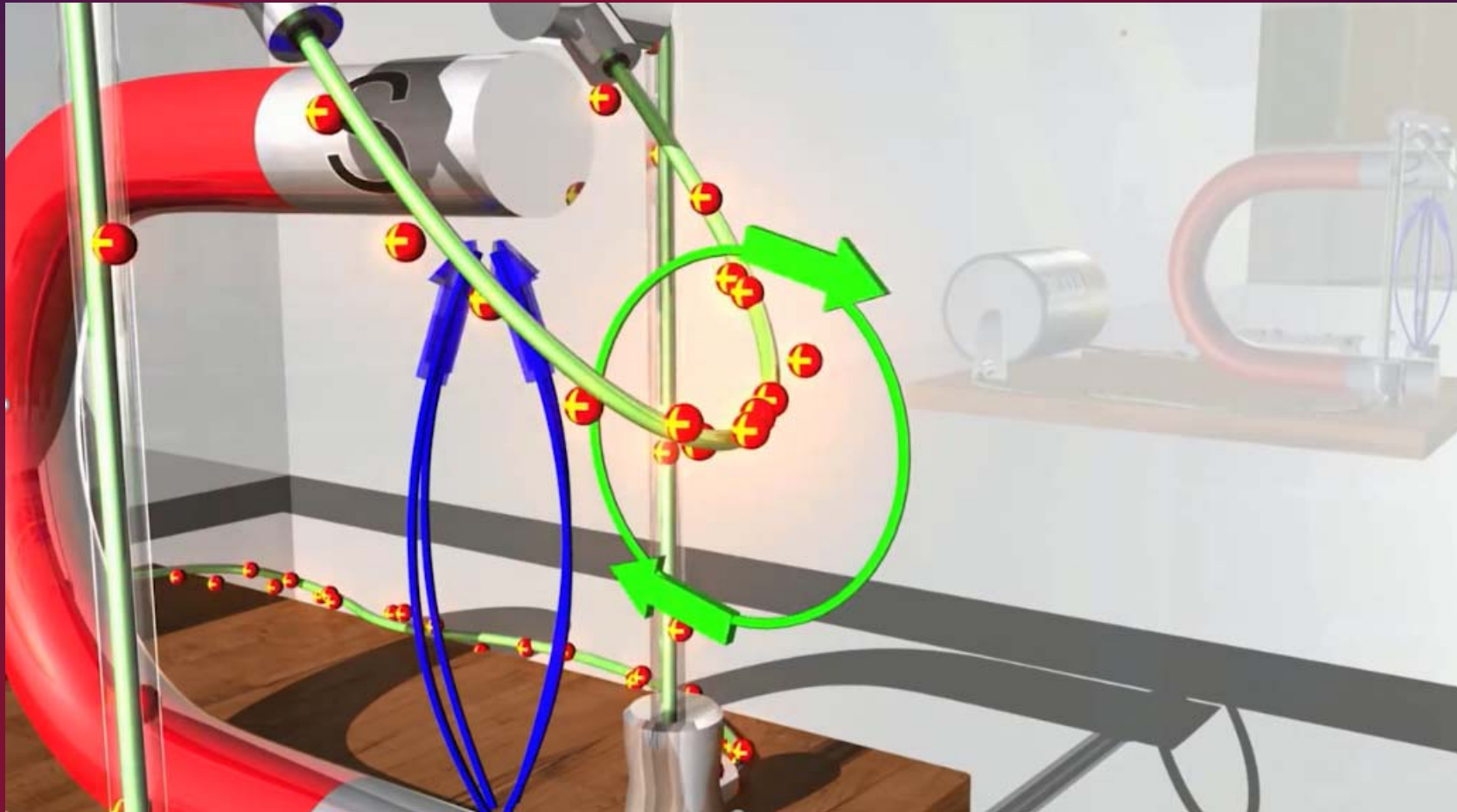
În fig.12d se remarcă faptul că forța care acționează asupra laturilor spirei și care determină rotirea acesteia este variabilă, prezentând așa-numite „pulsatii” (curba 1). În realitate, numărul de spire este mult mai mare astfel încât amplitudinea pulsațiilor este mult mai mică (curba 2). Cu cât numărul de lamele la colector este mai mare cu atât amplitudinea pulsațiilor este mai mică.

Având în vedere că mișcarea rotorului este o mișcare de rotație, forța Laplace ce acționează asupra laturilor spirei (spira fiind parcursă de curent) creează un cuplu, denumit cuplu electromagnetic. Variația cuplului electromagnetic (Fig. 12d) este identică cu a forței.

Practic, rotirea rotorului este cauzată de crearea acestui cuplu pe cale electromagnetică.

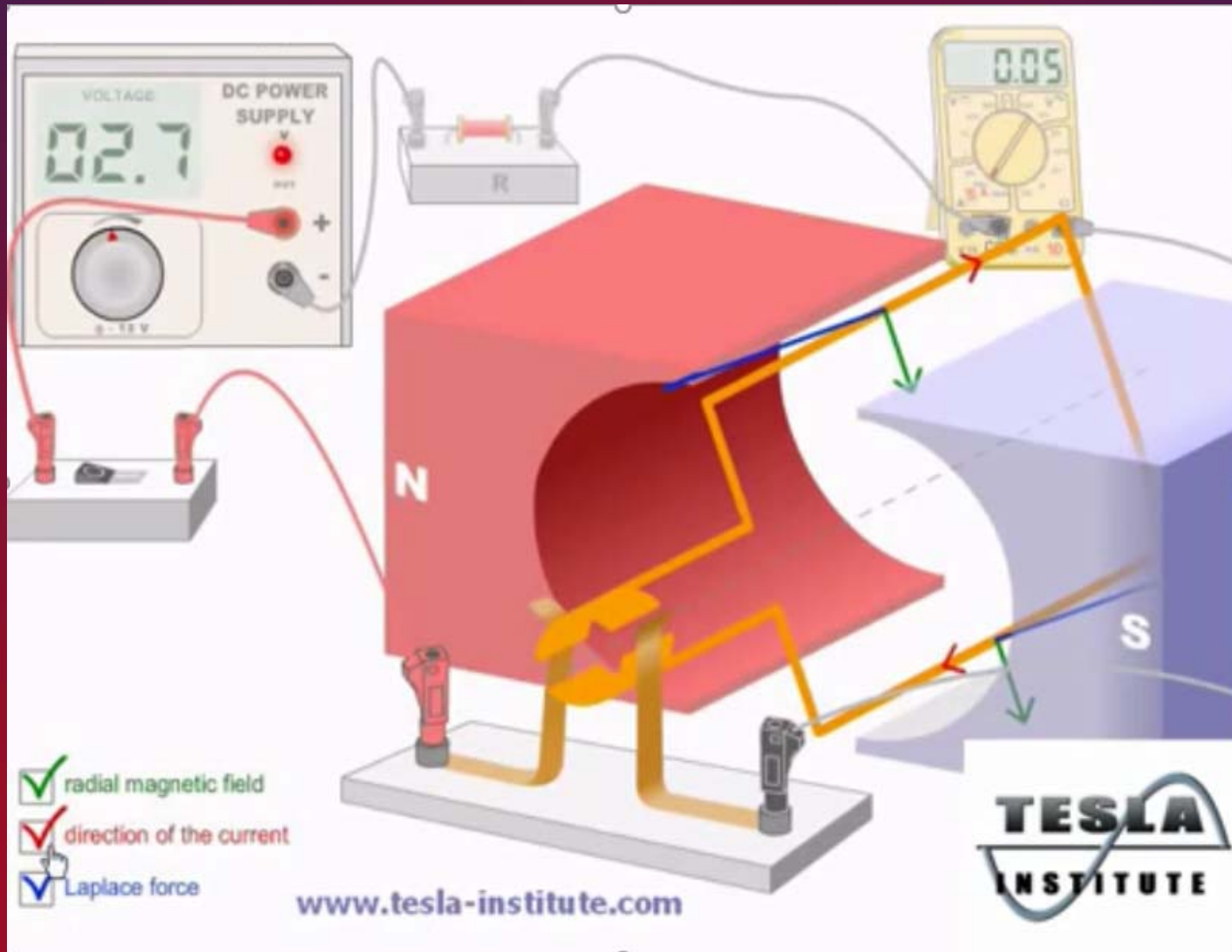


Forța Lorentz – film demonstrativ



Forța Lorentz – este forța ce acționează asupra unei particule electrice ce se deplasează într-un câmp magnetic

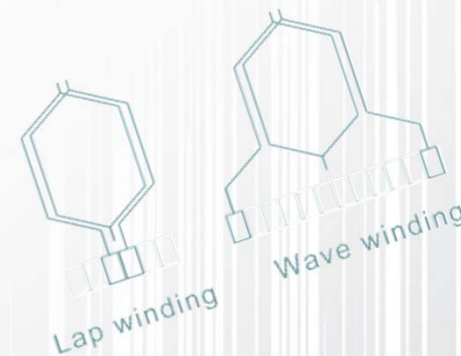
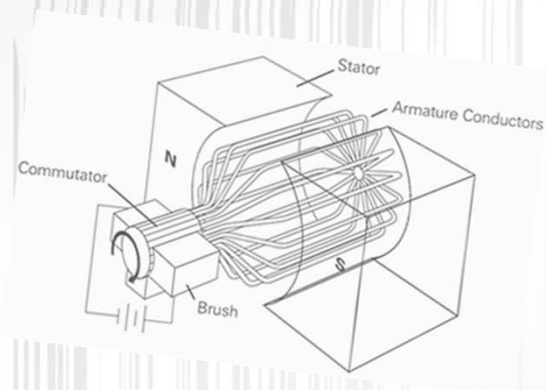
Forța Laplace – film demonstrativ



Forța Laplace – este forța ce acționează asupra unui conductor parcurs de curent și aflat într-un câmp magnetic

CURS 3

Înfășurările mașinilor de curent continuu



Clasificare

1

- Înfășurarea polilor principali
înfășurare inductoare (produce câmpul magnetic inductor)

2

- Înfășurarea polilor auxiliari
produce un câmp de anulare a reacției indusului

3

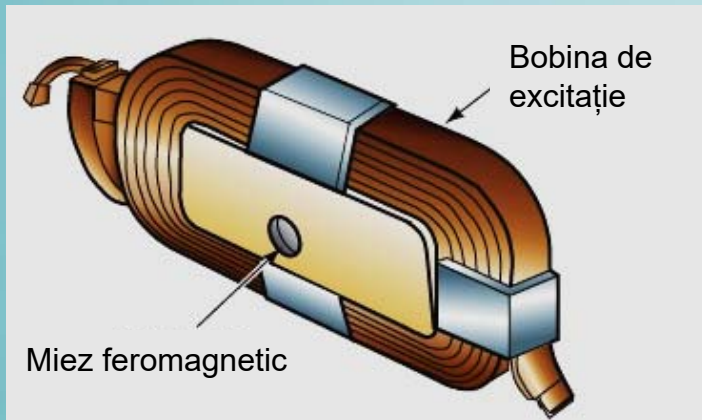
- Înfășurarea de compensație
produce un câmp suplimentar de anulare a reacției indusului

4

- Înfășurarea rotorului
înfășurarea indusă (sediul tensiunii induse de câmpul inductor)

1. Înfășurarea polilor principali

- a) Produce câmpul magnetic inductor. Este alimentată în c.c. iar bobinele sunt parcurse în așa fel încât să formeze poli alternanți ca polaritate.
- b) Este o înfășurare de tip concentrat, plasată pe poli inductori (statorici).
- c) Față de înfășurarea de pe rotor, ea poate fi conectată în serie, derivație sau poate fi separată (circuit electric separat).



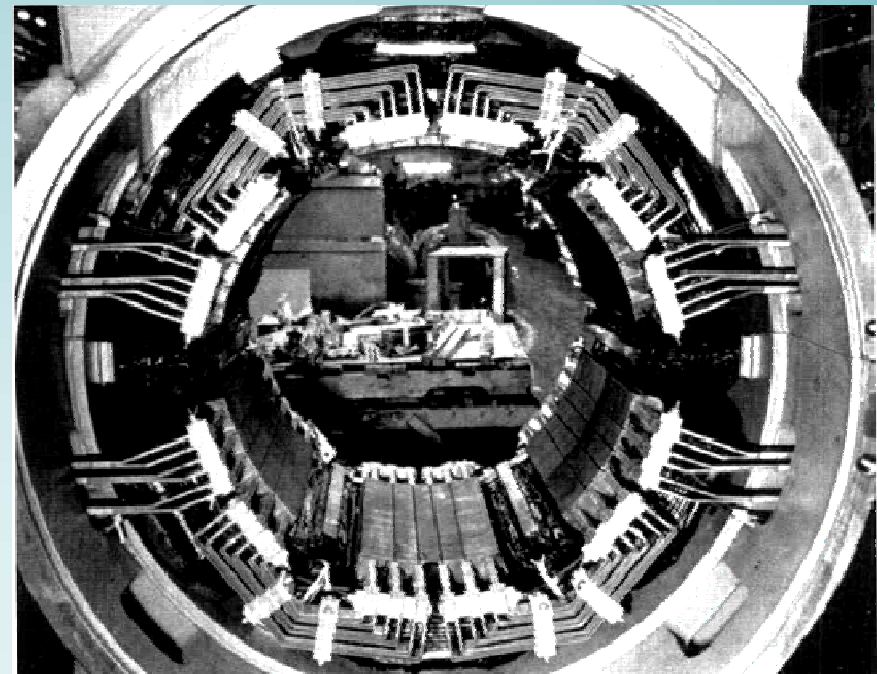
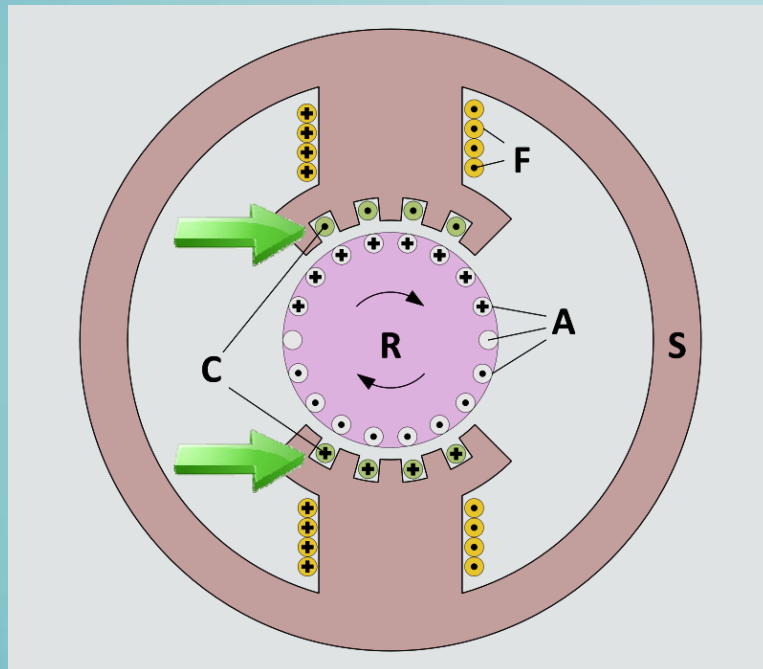
2. Înfășurarea polilor auxiliari

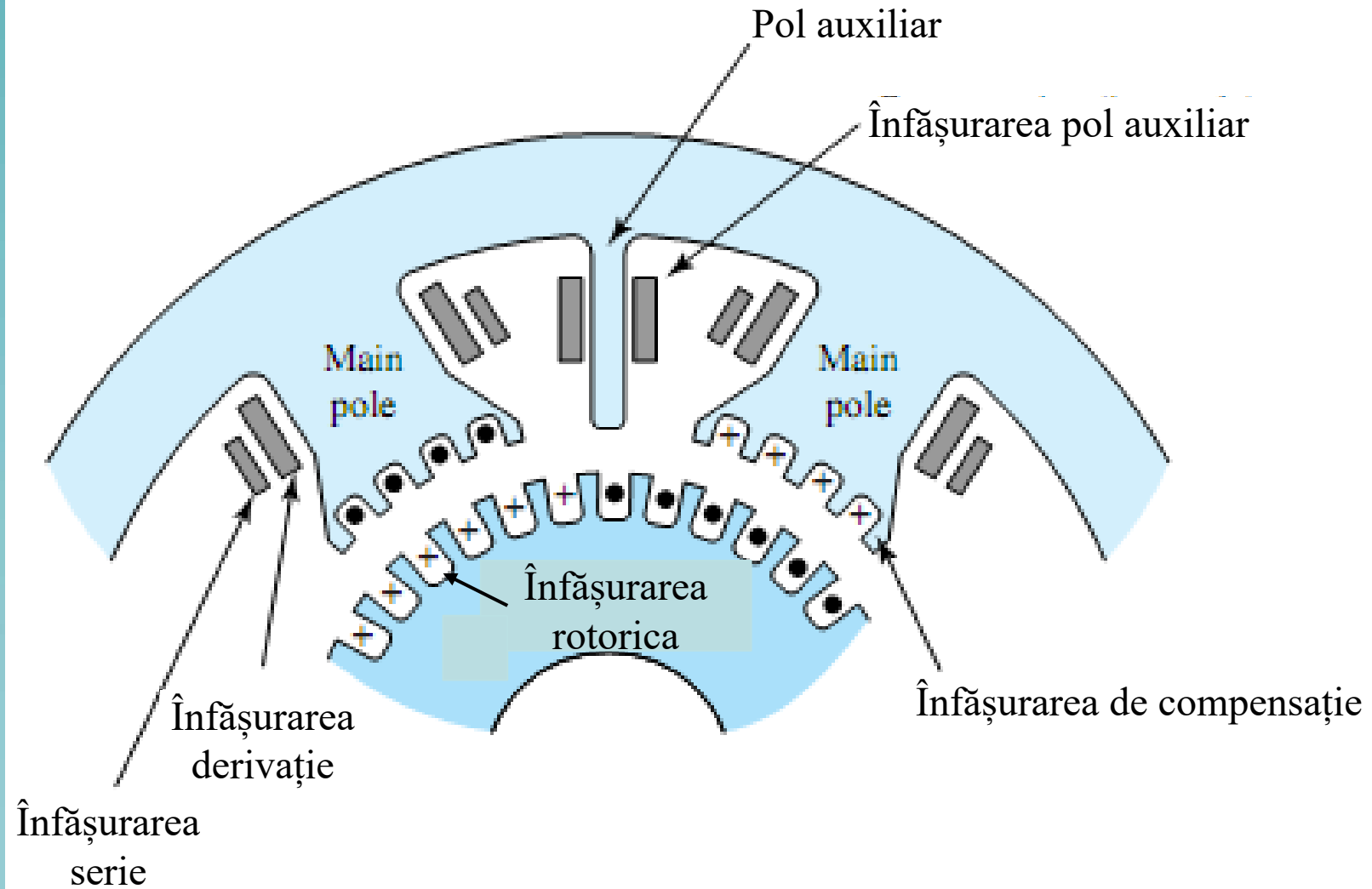
- a) Produce câmpul magnetic necesar anulării reacției indusului in zona interpolară (neutră).
- b) Înfășurare de tip concentrat, plasată pe polii auxiliari.
- c) Întotdeauna este conectată in serie cu înfășurarea indusului.



3. Înfășurarea de compensație

- a) Produce un câmp magnetic suplimentar pentru anularea reacției indusului (măsură suplimentară de îmbunătățire a comutației).
- b) Înfășurare de tip repartizat, plasată în creștături pe piesele polare ale polilor principali.
- c) Întotdeauna este conectată în serie cu înfășurarea indusului.

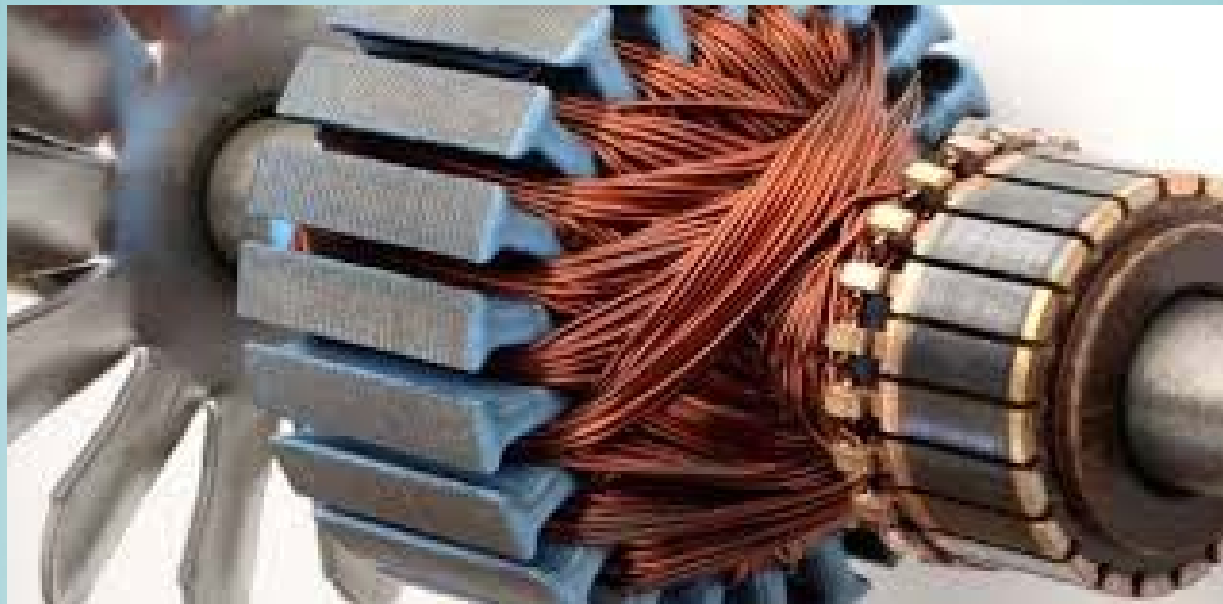




Plasarea înfășurărilor in mașina de c.c.

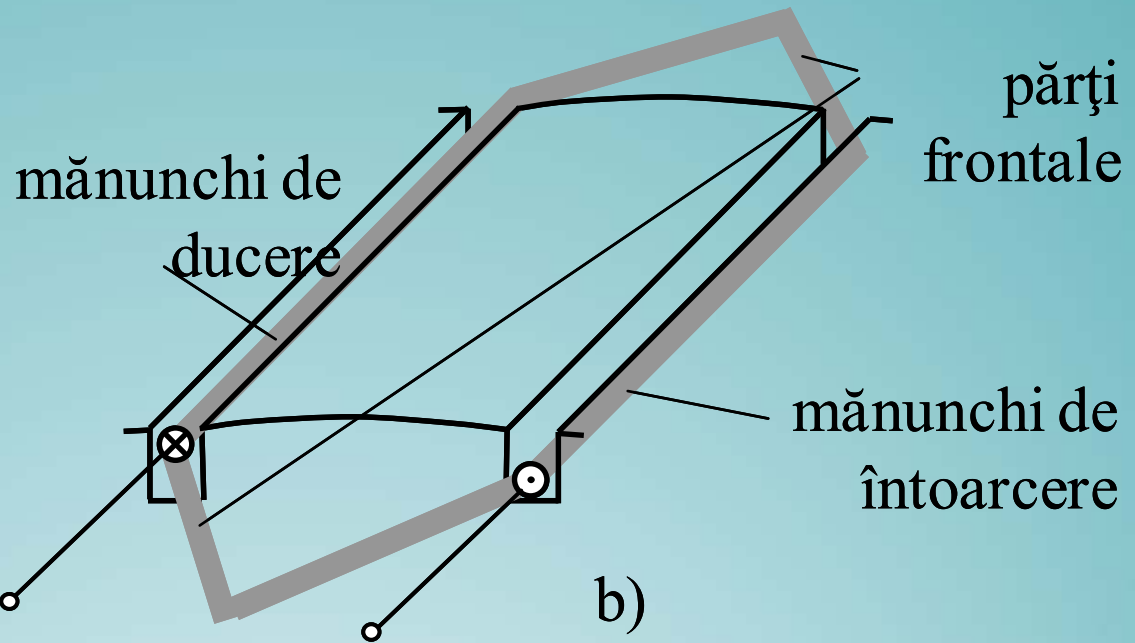
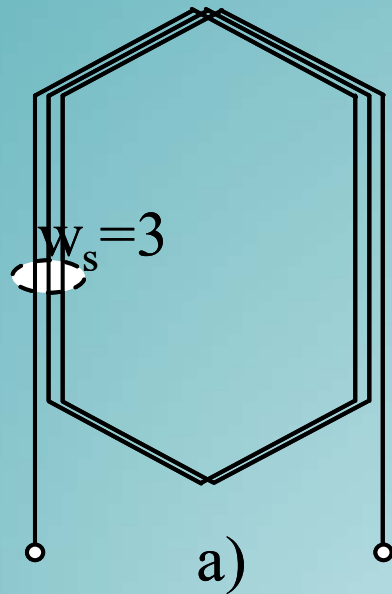
4. Înfășurarea indusului

- a) Sediul tensiunii induse de către câmpul inductor.
- b) Înfășurare de tip repartizat, plasată în creștăturile rotorului.
- c) Înfășurare închisă ale cărei capete sunt legate la lamelele colectorului.

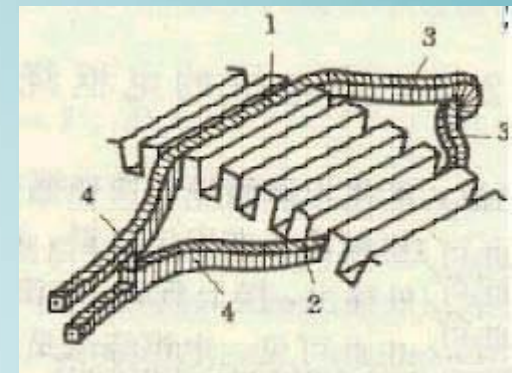


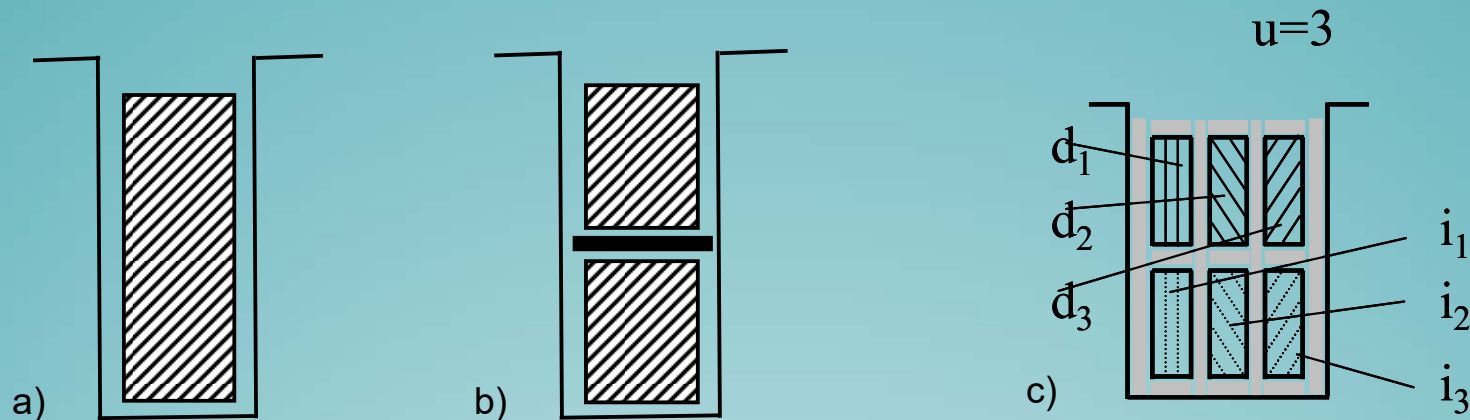
Elemente de construcție a înfășurărilor de c.c.:

a) secție compusă din 3 spire înseriate, b) secție introdusă în creștături



Întrucât este necesar ca înfășurarea rotorică să aibă un număr mare de conductoare (pentru creșterea tensiunii induse), înfășurarea rotorică are secții care au mai multe spire înseriate. În fig.a este prezentată o secție formată din 3 spire ($w_s = 3$).





a) Înfășurare într-un singur strat, b) înfășurare în 2 straturi, c) creștătură fizică echivalentă cu 3 creștături elementare

Plasarea laturilor secțiilor în creștături se poate face în două moduri:

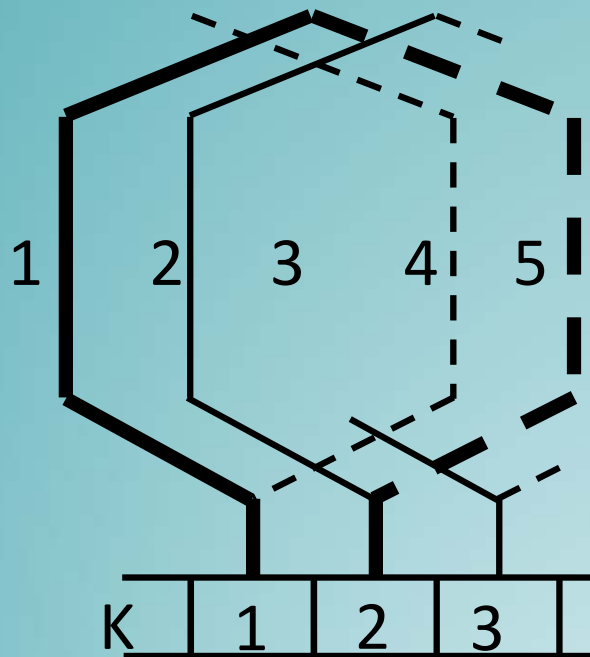
- Câte o singură latură în fiecare creștătură. Rezultă înfășurare într-un singur strat.
- Câte 2 laturi în fiecare creștătură aparținând unor spire sau secții diferite. Rezultă înfășurare în dublu strat.
- Când numărul de creștături rotorice este mai mic decât numărul de lamele de colector (și deci mai mic decât numărul de secții) atunci secții diferite sunt plasate în aceeași creștătură rotorica. Apare noțiunea de creștătură „elementară”.

Notații:

- numărul total de creștături fizice – Z
- numărul total de laturi de ducere sau întoarcere din fiecare creștătură fizică - u
- numărul de creștături elementare - Z_e

$$Z_e = u \cdot Z$$

Notații, definiții:



Secția – totalitatea spirelor cuprinse între 2 lamele ale colectorului, succesive d.p.d.v. electric

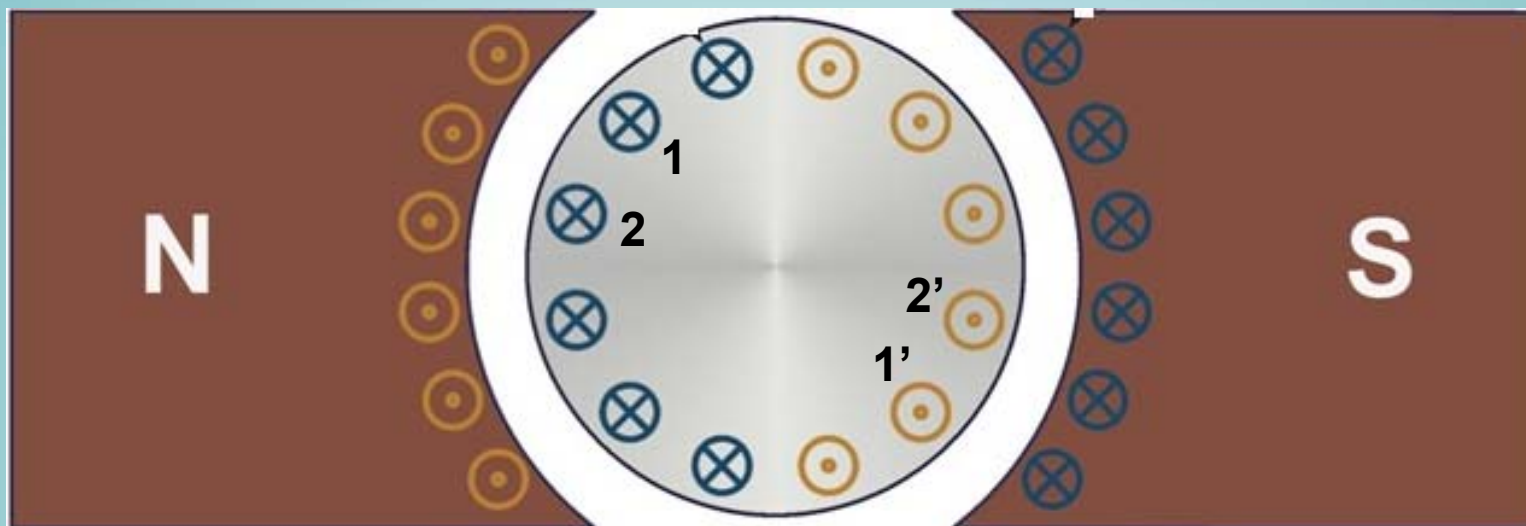
- Numărul total de secții – S
- Numărul total de lamele la colector – K

Deoarece la fiecare lamelă de colector sunt legate capetele a 2 secțiuni, atunci:

$$S = K$$

Condiții funcționale de realizare a înfășurării rotorice:

1. Pentru ca tensiunile induse într-o spire să se adune trebuie ca cele două laturi ale spirei să se găsească sub poli de polaritate opusă;
2. Pentru ca tensiunea în spire să fie maximă este necesar ca cele două laturi ale spirei să ocupe aceeași poziție în câmpul magnetic, adică distanța între laturile spirei să fie egală cu pasul polar.



Pasul polar, τ : distanța, în număr de creștături rotorice, între axele a doi poli statorici consecutivi.

$$\tau = \frac{Z}{2p}$$

unde: Z = număr de creștături rotorice

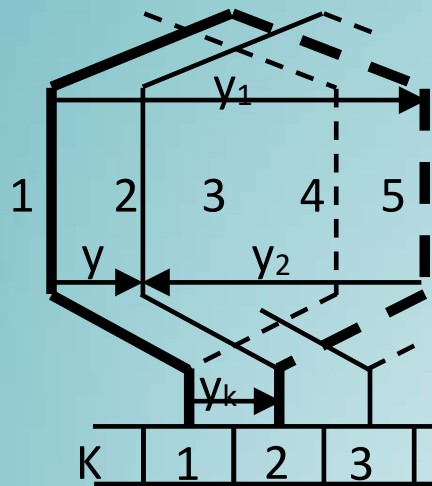
$2p$ = număr de poli statorici (p =număr de perechi de poli statorici)

Dacă pasul înfășurării (adică distanța dintre latura de ducere și cea de întoarcere a fiecărei secții) este egal cu pasul polar, se spune că înfășurarea are *pas diametral*.

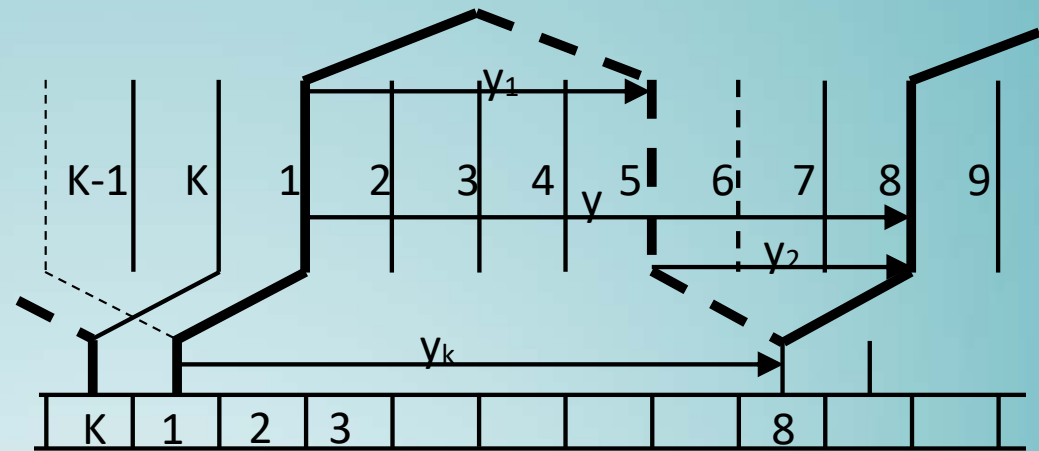
Există situații când pasul înfășurării poate fi mai mic („pas scurtat”) sau mai mare („pas alungit”).

Tipuri de înfășurări

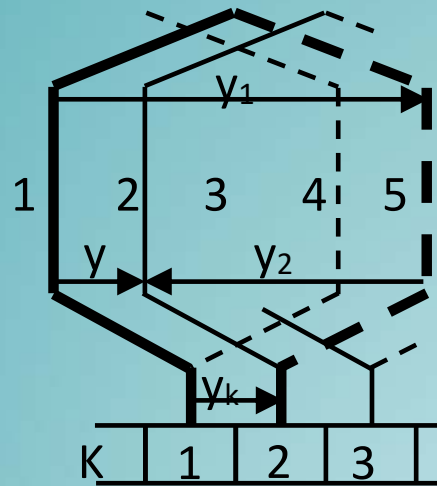
1. Înfășurări buclate



2. Înfășurări ondulate



Înfășurări buclate



$$y = y_1 - y_2$$

$$y_1 = \tau = \frac{Z}{2p}$$

1. Capetele fiecărei spire (secții) sunt legate (de regulă) la lamele alăturate ale colectorului;
2. Secțiile conectate în serie de pe aceeași cale de curent au laturile sub aceeași pereche de poli

Definiții:

- Pasul de întoarcere (pasul în spate): este distanța, măsurată în creștături, între latura de ducere și latura de întoarcere; se notează cu y_1
- Pasul de ducere (pasul în față): este distanța măsurată în creștături, între sfârșitul unei secții și începutul secției următoare; se notează cu y_2
- Pasul rezultat: este distanța măsurată în creștături, între laturile de ducere a două secții consecutive; se notează cu y

Relațiile de calcul ale pașilor înfășurării rotorice pentru cele două tipuri de înfășurări sunt:

Înfășurare buclată

$$y = y_1 - y_2$$

$$y_1 = \frac{K}{2p} \mp \varepsilon$$

$$2a = 2p$$

Înfășurare ondulată

$$y = y_1 + y_2$$

$$y = \frac{K \mp 1}{p}$$

$$2a = 2$$

$$K = S = Z_e = u \cdot Z$$

Observație: Atunci când numărul de poli ai mașinii este egal cu numărul de căi de curent ($2a=2p$), se realizează înfășurare buclată. Dacă numărul de căi de curent este egal cu 2, atunci se realizează înfășurare ondulată.

Înfășurare buclată simplă:
 $Z=16=K=S$, $2p=4$ - cu pas diametral

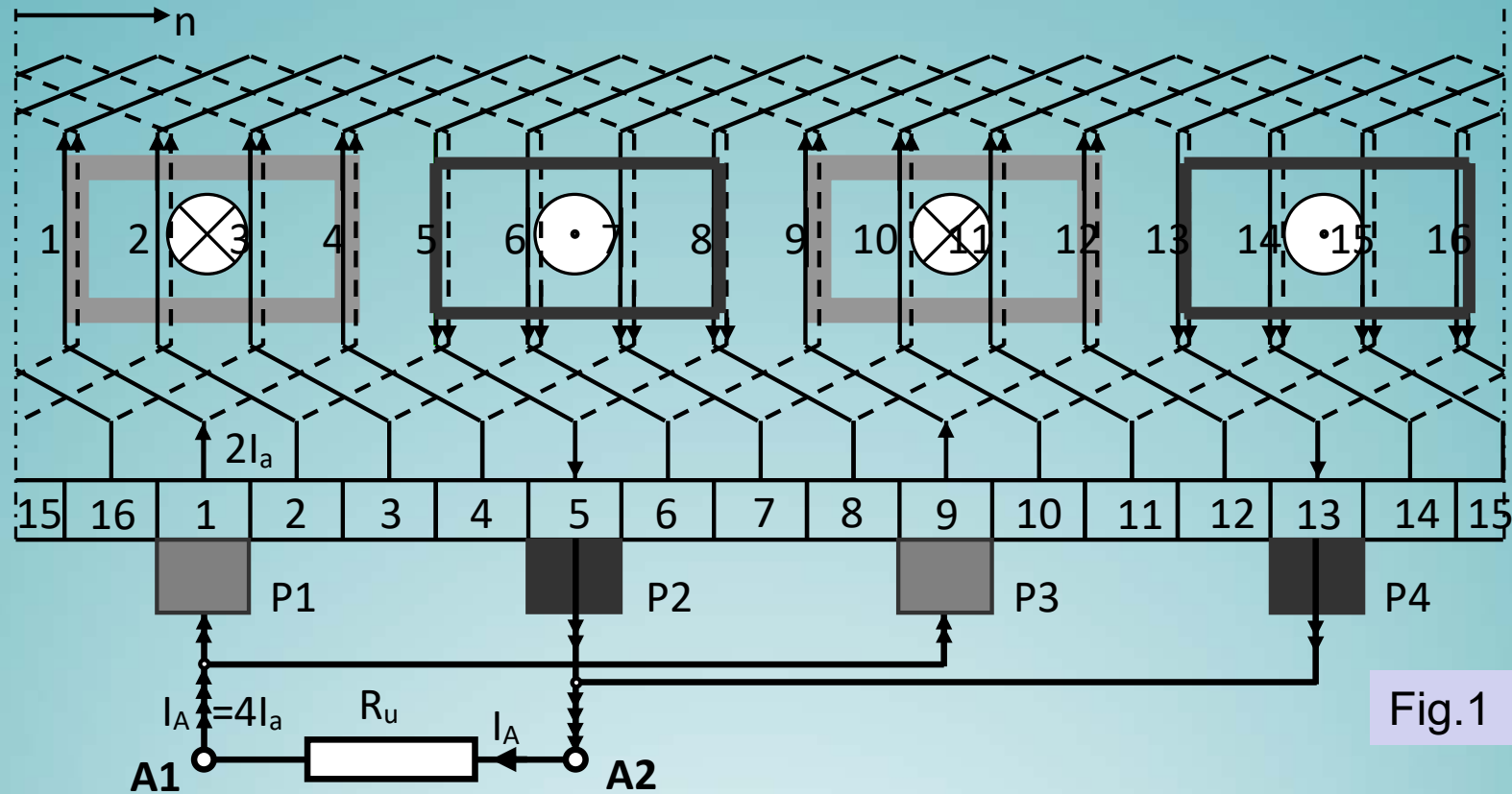


Fig.1

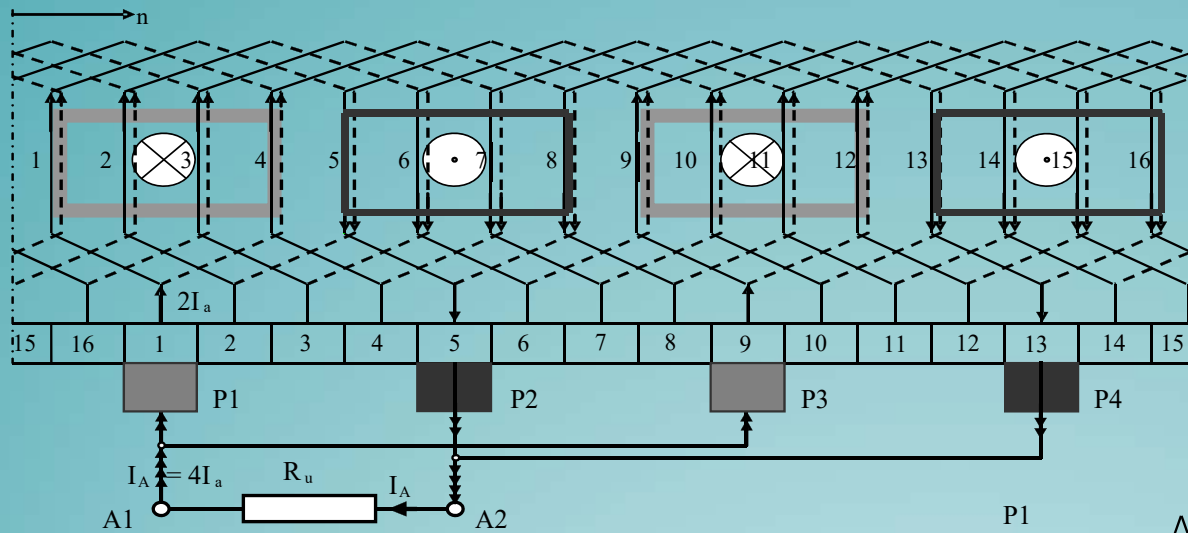
$$y_1 = \frac{Z}{2p} = \frac{16}{4} = 4; \quad y = y_k = +1; \quad y_2 = y_1 - y = 4 - 1 = 3$$

In fig.1 este prezentată o înfășurare buclată realizată pentru o mașină cu 4 poli statorici. Numărul de creștături rotorice, Z , este egal cu numărul de lamele de colector, K și cu numărul de secții, S . Poziția celor 4 poli statorici este figurată cu dreptunghiuri. Pe cele 16 lamele de colector calcă cele patru perii P_1 - P_4 (momentul ales pentru reprezentare este momentul în care fiecare perie calcă integral pe o singură lamelă). Ele sunt plasate simetric, la egala distanță una de alta. Periile de aceeași polaritate sunt legate între ele astfel încât capetele înfășurării rotorice sunt legate la bornele A_1 - A_2 . Rezistența R_u reprezintă circuitul extern al mașinii, respectiv sarcina.

Calcularea pașilor înfășurării (y , y_1 și y_2) permite realizarea secțiilor, plasarea acestora în creștături și conectarea la lamelele de colector.

Exemplu de secție: un capăt conectat la lamela 1, latura de ducere (linie plină) este plasată în creștătura 1, latura de întoarcere (linie punctată) în creștătura 5 (deoarece $y_1=4$), cel de-al doilea capăt al secției conectat la lamela 2. Urmează secția a doua care pornește de la lamela 2, trece prin creștătura 2 și se întoarce prin creștătura 6 și se leagă la lamela 3. Toate celelalte secții urmează aceeași regulă.

Modul de conectare a secțiilor între ele și legăturile la perii sunt prezentate în fig.2.



$2a=4$

Diagrama circuitului electric corespunzătoare momentului în care periile calcă doar pe o lamelă de colector.

Se observă existența a 4 căi de curent ($2a=4$) fiecare fiind formată din câte 4 secții. Prin fiecare cale de curent circulă un curent notat cu I_a . Curentul prin sarcină este $I_A=4I_a$.

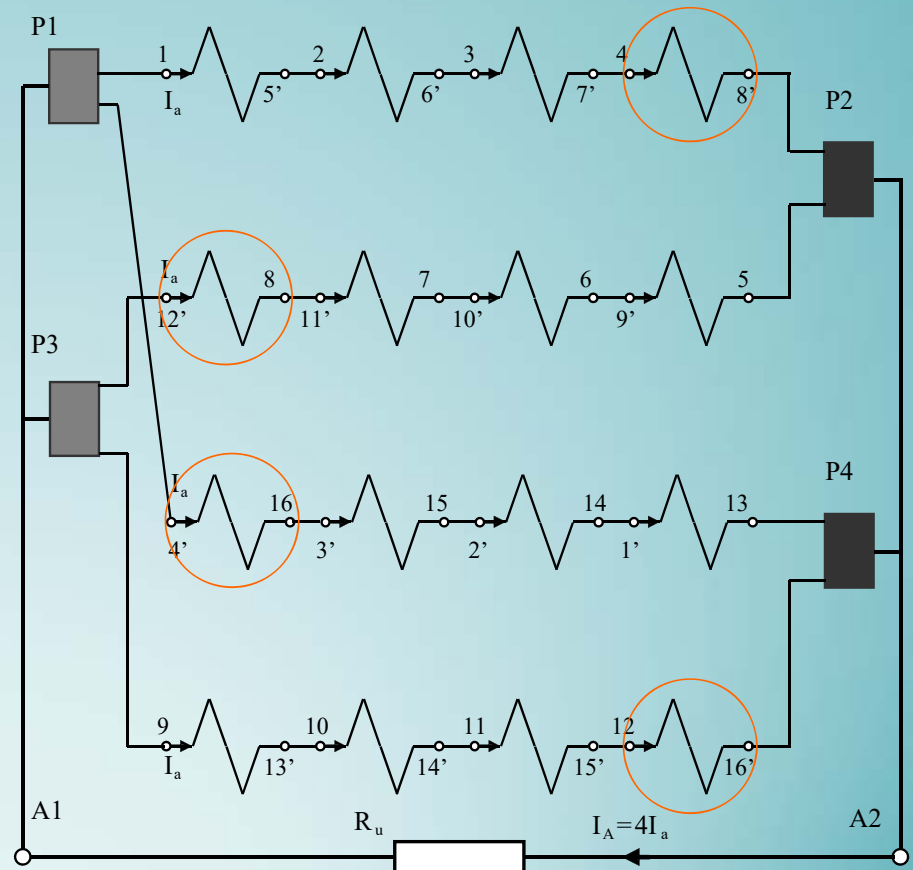


Fig.2

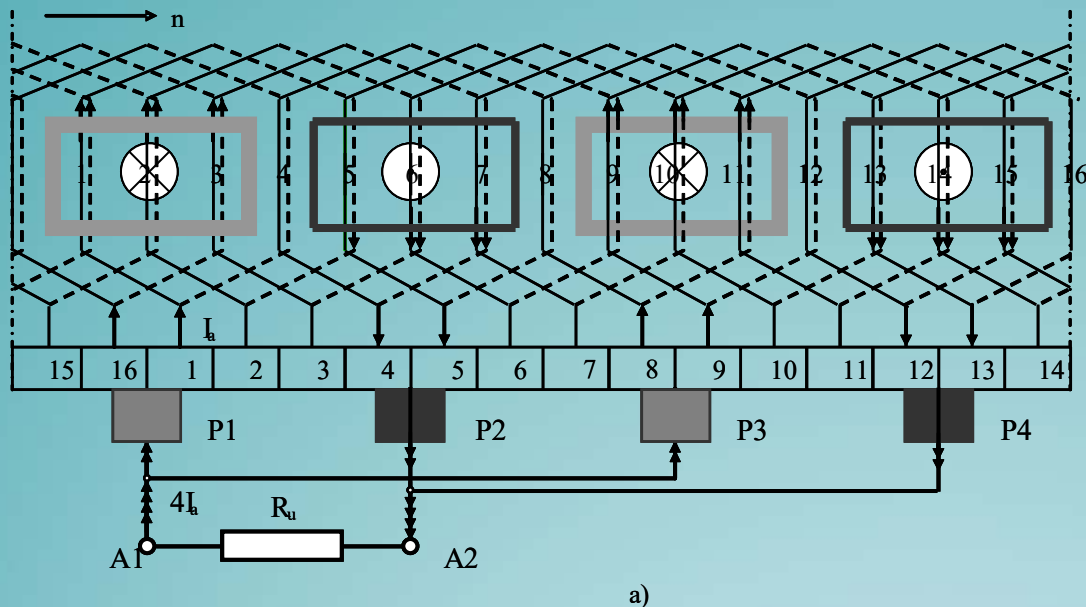
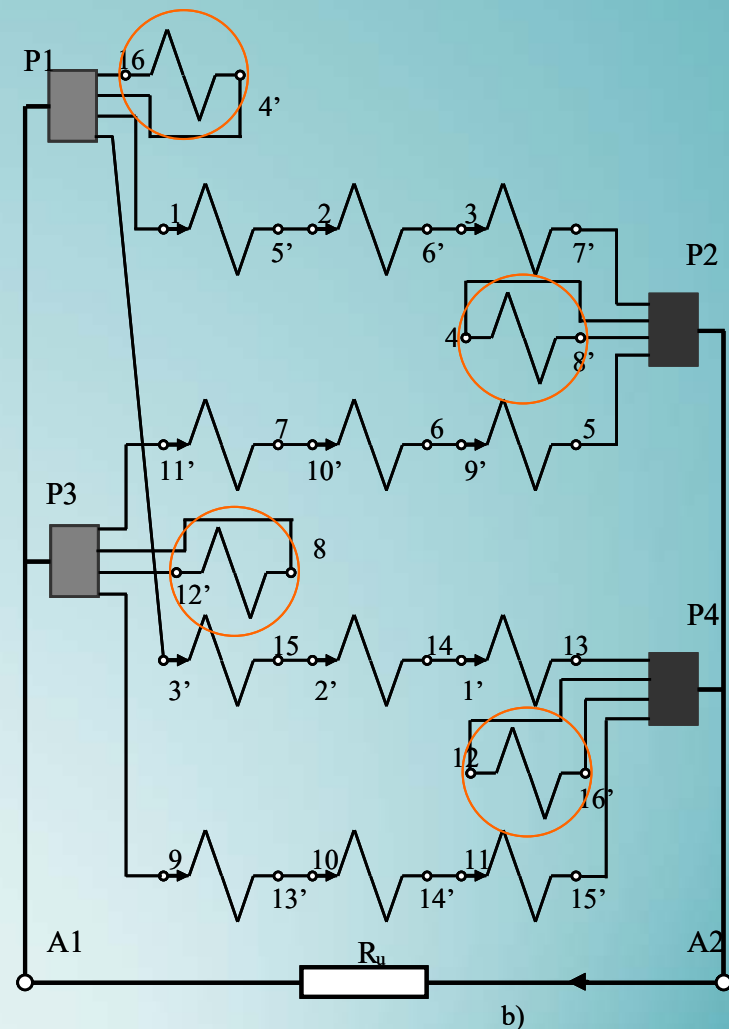


Diagrama circuitului electric corespunzătoare momentului în care periile calcă pe două lamele vecine de colector. Drept urmare, unele dintre secții sunt scurtcircuitate (cele încercuite). Rămân tot 4 căi de curent însă acum fiecare dintre ele conține doar 3 secții.

Este important ca în acest moment de scurtcircuitare, laturile secțiilor respective să se afle în zona interpolară. Acolo, teoretic, câmpul este nul, deci tensiunea indusă în secție este zero, iar scurtcircuitarea ei nu are nici un efect negativ.

Fig.3



Înfășurare ondulată simplă:

$$Z=17=K=S, 2p=4$$

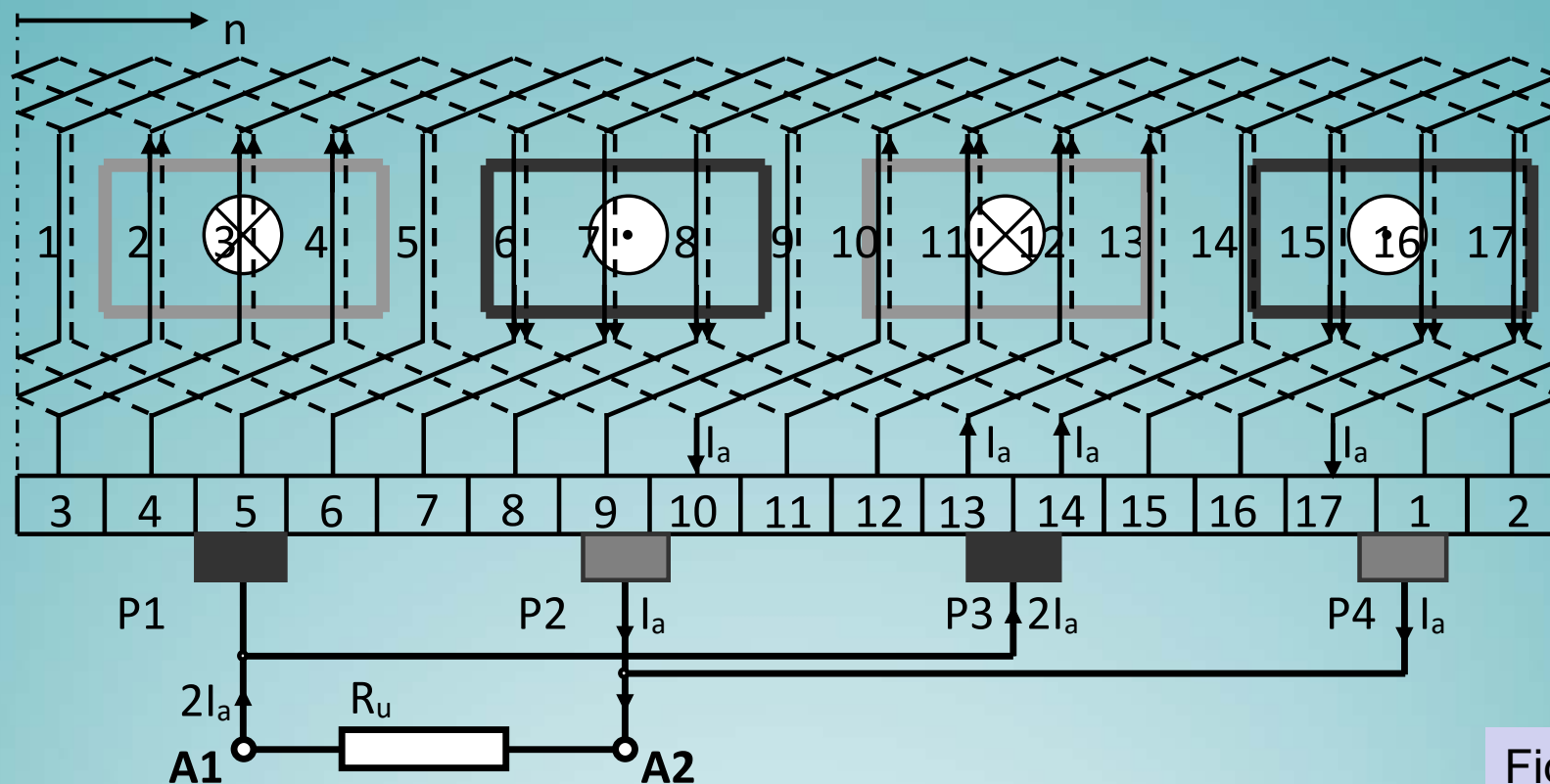


Fig.4

$$y_1 = \frac{Z}{2p} = \frac{17}{4} \neq \text{n.}\hat{\text{i}}. \quad \text{Aleg } y_1=4$$

$$y = y_k = \frac{K \pm 1}{p} = \frac{17 \pm 1}{2} = 8$$

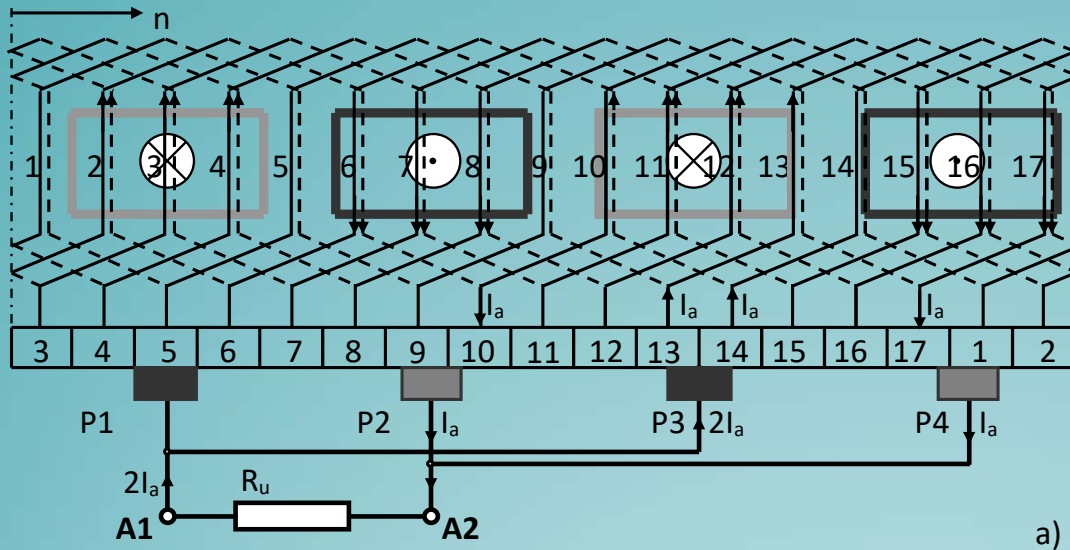
$$y_2 = y - y_1 = 8 - 4 = 4$$

In fig.4 este prezentată o înfășurare ondulată realizată tot pentru o mașină cu 4 poli statorici. Numărul de creștături rotorice, Z , este egal cu numărul de lamele de colector, K și cu numărul de secții, S dar este un număr impar (astfel încât înfășurarea să se poată „închide”). Pe cele 17 lamele de colector calcă cele patru perii P_1 - P_4 dar, de aceasta dată, poziția periiilor pe lamele este diferită: în timp ce peria P_1 calcă doar pe lamela 5, celelalte trei perii calcă pe câte două lamele de colector, scurtcircuitând anumite secții.

La calcularea pașilor înfășurării (y , y_1 și y_2) se observă că pasul de ducere nu rezultă un număr întreg. Fizic însă el nu poate fi decât număr întreg (este număr de creștături). Se alege numărul întreg imediat inferior sau imediat superior. În cazul pasului rezultat, y și a pasului la colector, y_k s-a ales semnul plus din relație (în mod egal se poate alege semnul minus).

Exemplu de secție: un capăt conectat la lamela 5, latura de ducere (linie plină) este plasată în creștătura 5, latura de întoarcere (linie punctată) în creștătura 9 (deoarece $y_1=4$), cel de-al doilea capăt al secției conectat la lamela 13 (deoarece $y_k=8$). Urmează secția a doua care pornește de la lamela 13, trece prin creștătura 13 (deoarece $y=8$) și se întoarce prin creștătura 17 și se leagă la lamela 17. Toate celelalte secții urmează aceeași regulă.

Modul de conectare a secțiilor între ele și legăturile la perii sunt prezentate în fig.5.



Înfășurare ondulată simplă:
 $Z=17=K=S$, $2p=4$

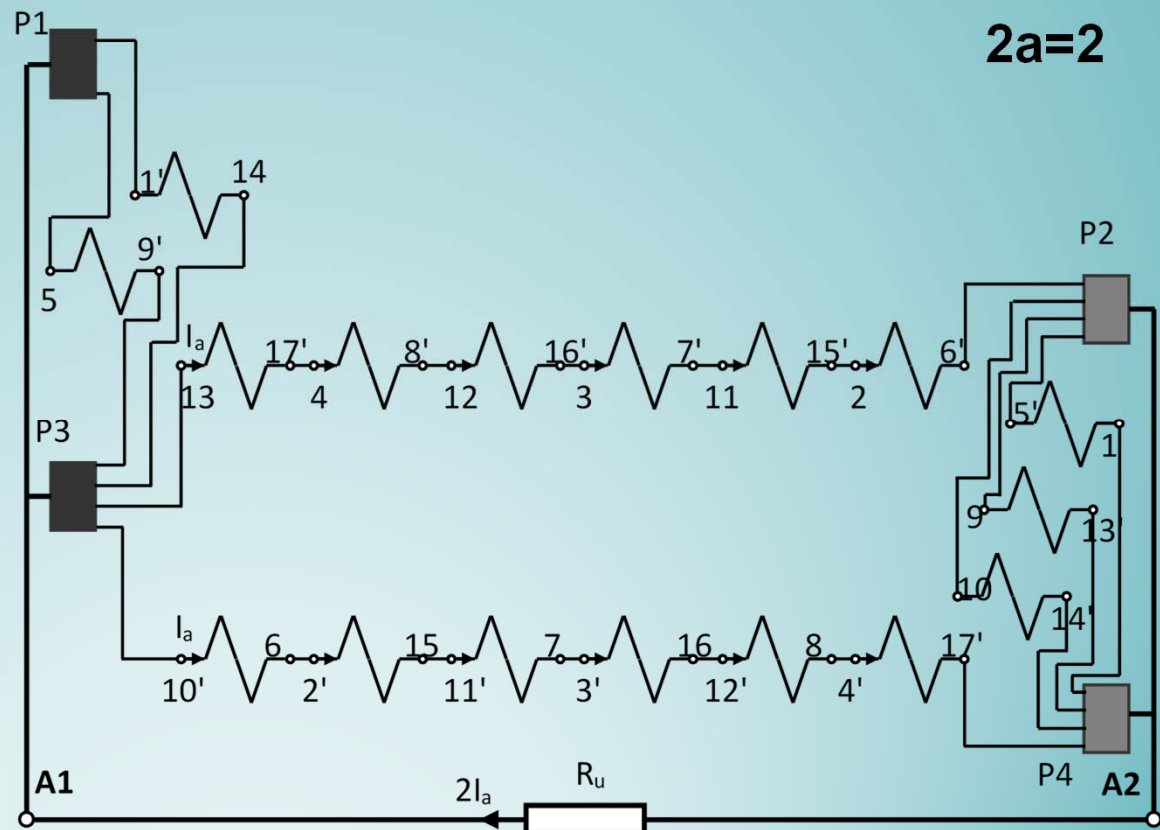


Fig.5

Poziția periilor determină scurtcircuitarea a 5 secții: 1'-14 și 5-9' între periile P_1 și P_3 respectiv 5'-1, 9-13' și 10-14' între periile P_2 și P_4 .
Restul secțiilor formează 2 căi de curent ($2a=2$).

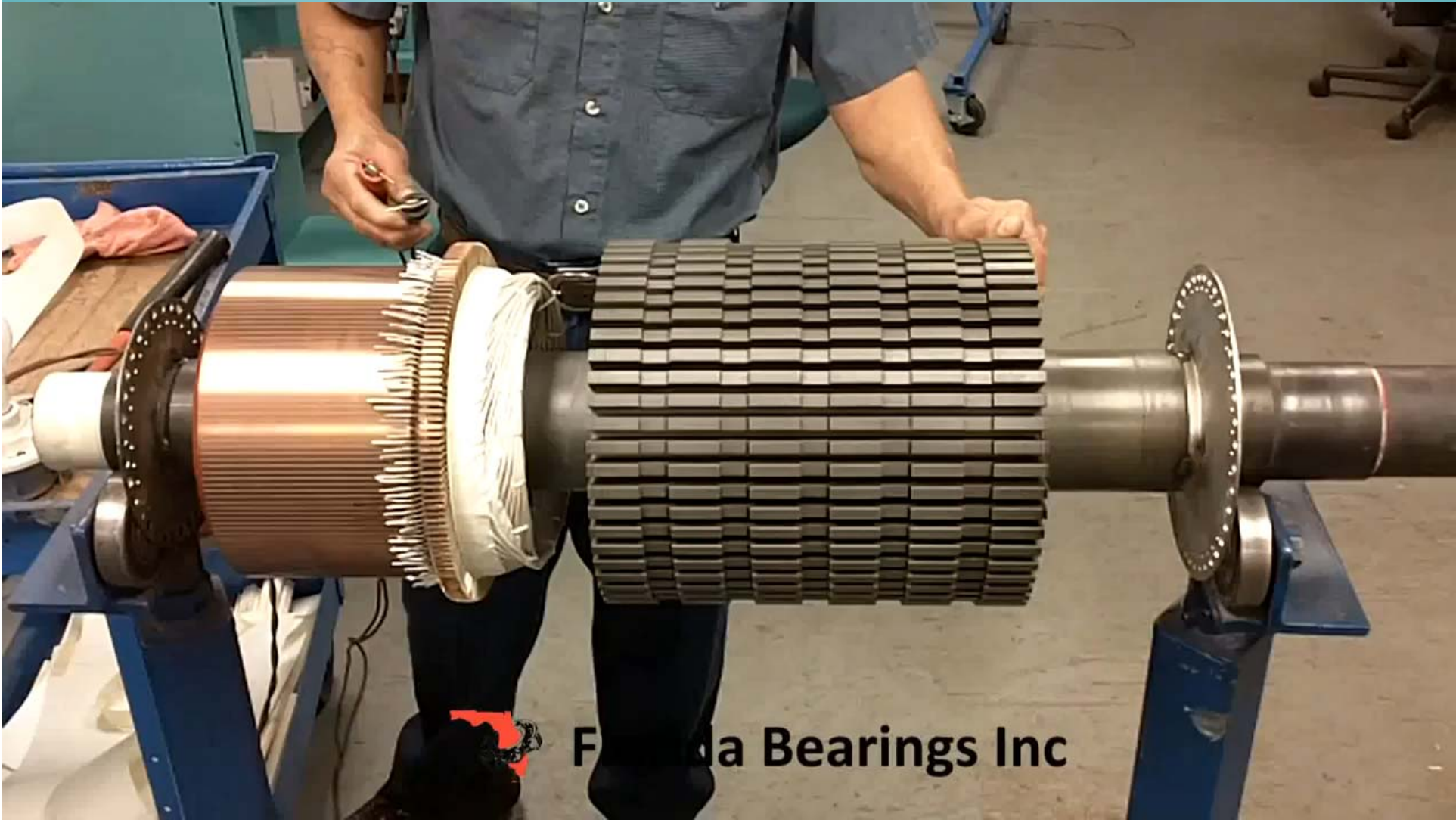
Curentul prin sarcină este $I_A=2I_a$.



Atât în cazul înfășurării buclate cât și în cazul înfășurării ondulate, datorită rotirii rotorului și a modificării poziției periilor pe lamelele colectorului, secțiile scurtcircuitate se schimbă și prezența secțiilor într-o anumită cale de curent se schimbă, de asemenea.



- *Înfășurare inductoare*
- *Înfășurare indusă*
- *Înfășurare concentrată*
- *Înfășurare repartizată*
- *Înfășurare ondulată*
- *Înfășurare buclată*



Florida Bearings Inc

CURS 4

Expresia tensiunii induse la perile mașinii de C.C.

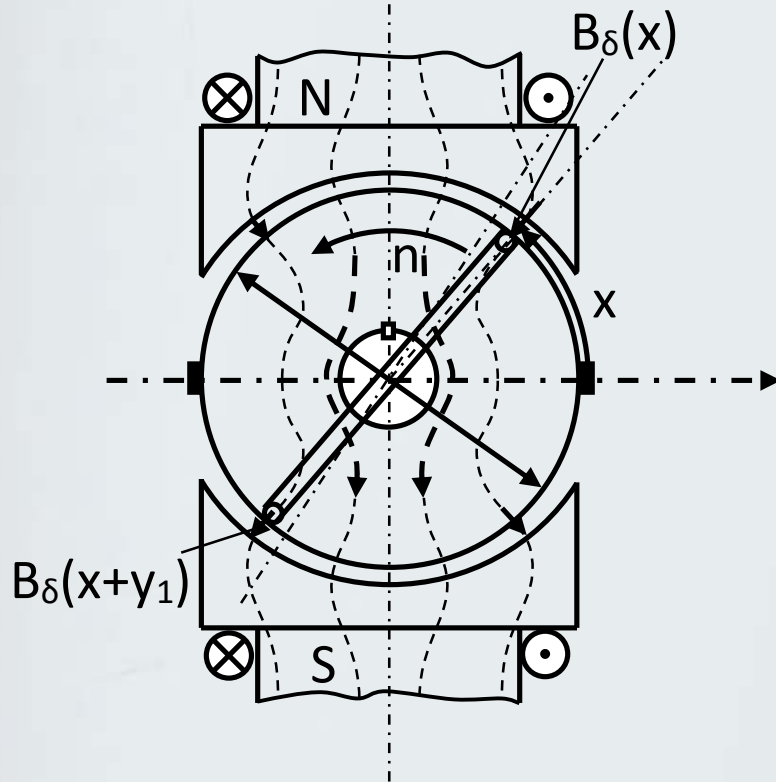
Expresia cuplului electromagnetic al mașinii de C.C.

Reacția indusului la mașina de C.C.



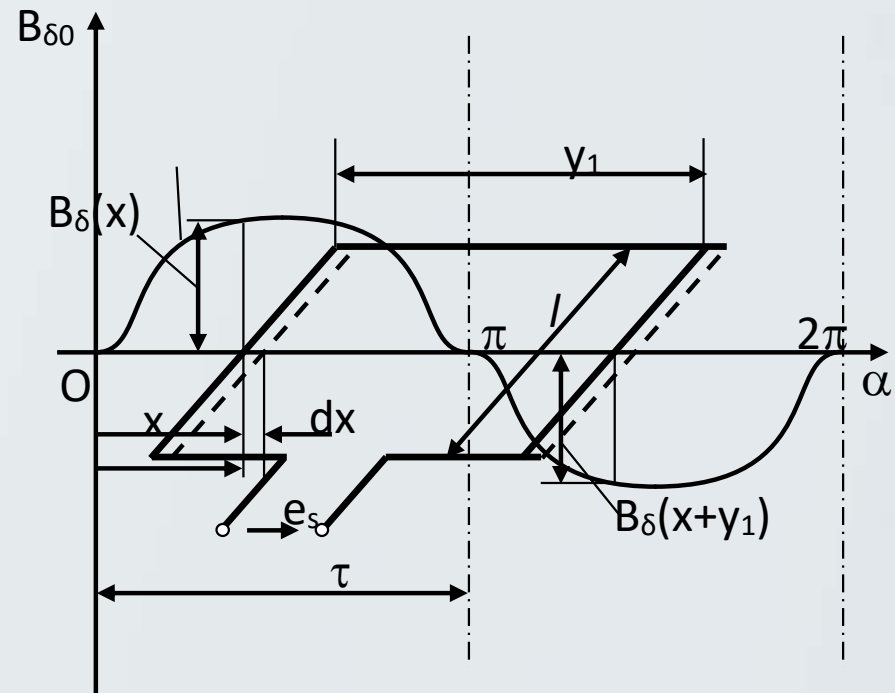
Expresia tensiunii la bornele mașinii de C.C.

Fig.1



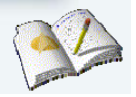
a)

Secțiune transversala MCC



b)

Variația inducției in întrefier



Expresia tensiunii la bornele mașinii de C.C.

- Se consideră o mașină de c.c. bipolară având polaritatea polilor indicată în fig.1a. Liniile câmpului magnetic inductor se închid pe traseul pol N, întrefier, rotor, întrefier, pol S și jugul statoric (care nu este figurat pe desen). Densitatea liniilor de câmp este aproximativ constantă sub poli și teoretic zero în axa interpolară (din acest motiv ea se mai numește și axa neutră a mașinii). Variația câmpului în întrefier arată ca în fig.1b unde, prin convenție, s-a considerat că în dreptul polului N câmpul este pozitiv iar în dreptul polului S câmpul este negativ. Forma de variație a câmpului este oarecum trapezoidală (câmpul este maxim și aproximativ constant sub poli și devine rapid zero între poli).
- Se consideră o singură secție, plasată în două creștături rotorice având w_s spire și a cărei latură de ducere se află la distanța x de axa interpolară iar latura de întoarcere la distanța $x+y_1$ (pasul de întoarcere al secției este egal cu y_1).
- Secțiunea se rotește odată cu rotorul, cu viteza n , în sensul indicat (sens trigonometric) și intersectează liniile câmpului inductor. Fluxul ce străbate o singură spira a secției se numește *flux fascicular*.



Expresia tensiunii la bornele mașinii de C.C.

Expresia fluxului fascicular :

$$d\varphi = B_{\delta_0}(x) \cdot l \cdot dx$$

unde: l - lungimea rotorului deci a laturii spirelor

$l \cdot dx$ - element de arie infinitezimal

$B_{\delta_0}(x)$ - valoarea inducției din întrefier. Ea variază în funcție de poziția ocupată la un moment dat de laturile secției.

Întrucât pe elementul de arie infinitezimal ($l \cdot dx$) se poate considera că inducția în întrefier rămâne constantă, adică:

$$B_{\delta_0}(x) = ct.$$

atunci:

$$\varphi = \int_x^{x+y_1} B_{\delta_0}(x) \cdot l \cdot dx$$

Fluxul total al secției (ce are w_s spire) este, prin urmare:

$$\Psi = w_s \cdot \varphi$$



Expresia tensiunii la bornele mașinii de C.C.

Tensiunea indusă în spirele unei secții, conform legii inducției electromagnetice, datorită rotirii secției în câmpul magnetic inductor, este:

$$e_s = - \frac{d\Psi}{dt} = - w_s \cdot \frac{d\varphi}{dt}$$

sau:

$$e_s = - w_s \cdot \frac{d}{dt} \int_x^{x+y_1} B_{\delta_0}(x) \cdot l \cdot dx$$

respectiv

$$e_s = - w_s \cdot \frac{dx}{dt} \cdot l [B_{\delta_0}(x + y_1) - B_{\delta_0}(x)]$$

$$e_s = w_s \cdot l \cdot \frac{dx}{dt} [B_{\delta_0}(x) - B_{\delta_0}(x + y_1)]$$



Expresia tensiunii la bornele mașinii de C.C.

Dar: $x = v \cdot t$ \Rightarrow $dx = v \cdot dt$ \Rightarrow $\frac{dx}{dt} = v$

v – viteza liniara (periferica) a rotorului

Dacă se consideră pasul spirei egal cu pasul diametral, adică $y_1 = \tau$ atunci

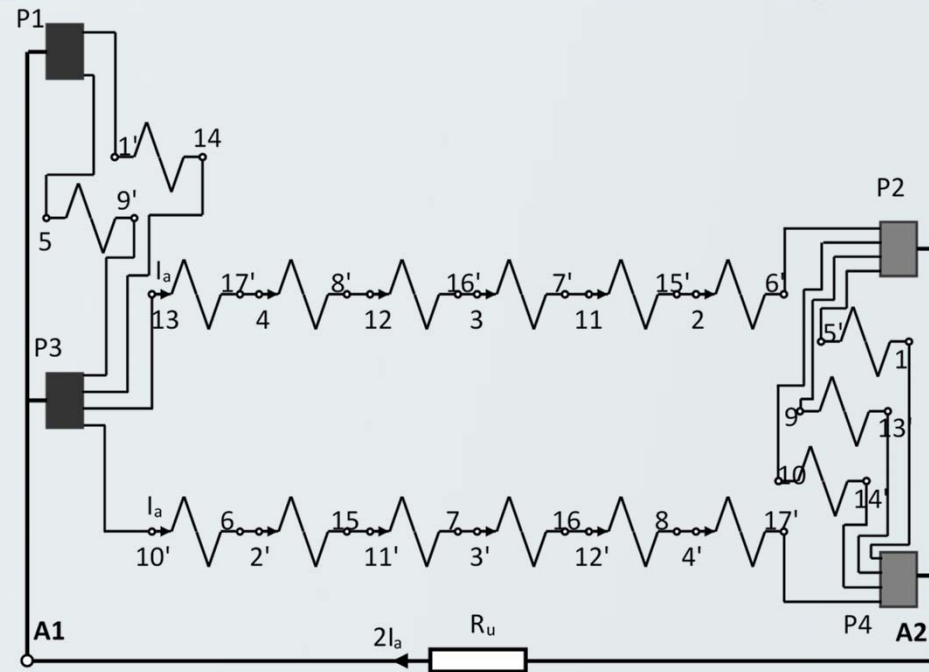
$$B_{\delta_0}(x) = -B_{\delta_0}(x + y_1)$$

iar expresia tensiunii induse într-o secție devine:

$$e_s = 2 \cdot B_{\delta_0}(x) \cdot w_s \cdot l \cdot v$$



Expresia tensiunii la bornele mașinii de C.C.



Tensiunea la perii este egală cu suma tensiunilor induse în secțiunile unei căi de curent. Ele trebuie însumate având însă în vedere că fiecare secție ocupă o anumită poziție în câmpul inductor.

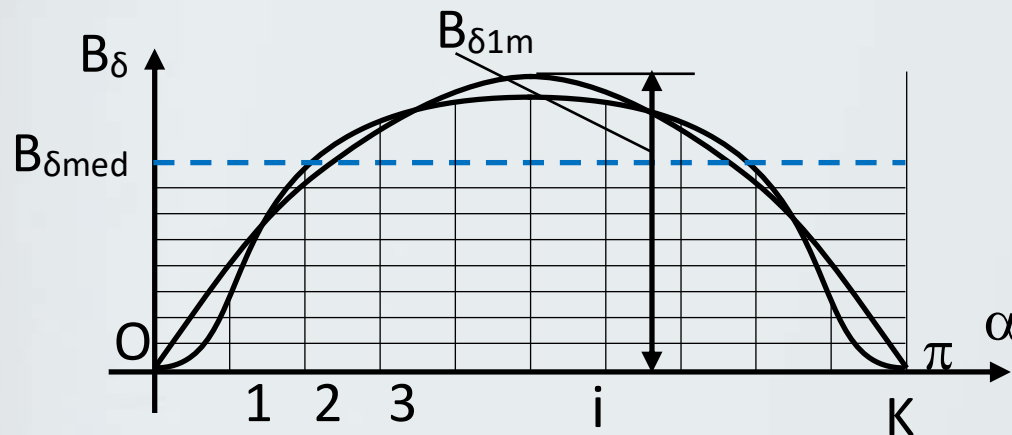
Dacă se considera că în fiecare cale de curent sunt k secții atunci:

$$e_0 = \sum_{i=1}^k e_{si} = 2 \cdot l \cdot v \cdot w_s \cdot \sum_{i=1}^k B_{\delta_i}(x)$$



Expresia tensiunii la bornele mașinii de C.C.

Pentru modul de variație a inducției sub polul inductor se poate defini matematic o valoare medie (linia punctată) ce înlocuiește forma de variație trapezoidală și poate fi obținută cu expresia matematică:



$$B_{\delta med} = \frac{1}{\tau} \cdot \int_0^{\tau} B_{\delta_0}(x) dx$$

Dacă împărțim intervalul $(0, \pi)$ ce corespunde unui pas polar, τ , în k părți egale (k este numărul de laturi de secții din interiorul unui pas polar) atunci, prin integrare grafică obținem:

$$B_{\delta med} = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k B_{\delta i} \quad \text{adică} \quad \sum_{i=1}^k B_{\delta i} = k \cdot B_{\delta med}$$



Expresia tensiunii la bornele mașinii de C.C.

Prin urmare, expresia tensiunii induse într-o cale de curent este:

$$e_0 = 2 \cdot l \cdot v \cdot w_s \cdot k \cdot B_{\delta_{med}}$$

Dacă fiecare secție are w_s spire și fiecare cale de curent are k secții, atunci vor fi $2a \cdot k \cdot w_s$ spire respectiv $N = 2 \cdot 2a \cdot k \cdot w_s$ conductoare, de unde

$$k = \frac{N}{4a \cdot w_s}$$

De asemenea: $v = \Omega \cdot R = \frac{2\pi n}{60} \cdot \frac{D}{2} = \frac{n}{60} \cdot \pi D$

iar: $\pi D = 2p\tau$

$\Rightarrow v = \frac{n}{60} \cdot 2p\tau$



Expresia tensiunii la bornele mașinii de C.C.

Expresia tensiunii la bornele mașinii devine:

$$E_0 = 2 \cdot \frac{n}{60} \cdot 2p\tau \cdot l \cdot w_s \cdot \frac{N}{4 \cdot a \cdot w_s} \cdot B_{\delta_{med}}$$

Dar: $B_{\delta_{med}} \cdot l \cdot \tau = B_{\delta_{med}} \cdot S_{pas\ polar} = \phi_0$

Deci:

$$E_0 = \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{60} \cdot n \cdot \phi_0$$

Se notează: $\frac{p}{a} \cdot \frac{N}{60} = k_e$ (constantă ce ține cont de parametrii constructivi)



$$E_0 = k_e \cdot n \cdot \phi_0$$

funcționare la gol

$$E = k_e \cdot n \cdot \phi$$

funcționare in sarcină



Expresia cuplului electromagnetic al mașinii de C.C.

Cuplul, sau momentul forței, este o mărime fizică ce exprimă cantitativ capacitatea forței de a roti un rigid în jurul unei drepte.

Cuplul electromagnetic rezultă ca urmare a forței Laplace ce acționează asupra conductoarelor rotorice, parcurse de curent și aflate în câmpul magnetic al polilor principali. Întrucât forța Laplace acționează tangențial la suprafața rotorului, ea determină apariția unui cuplu, ce este de natură electromagnetică. În timpul funcționării mașinii de c.c., cuplul electromagnetic acționează permanent asupra rotorului.

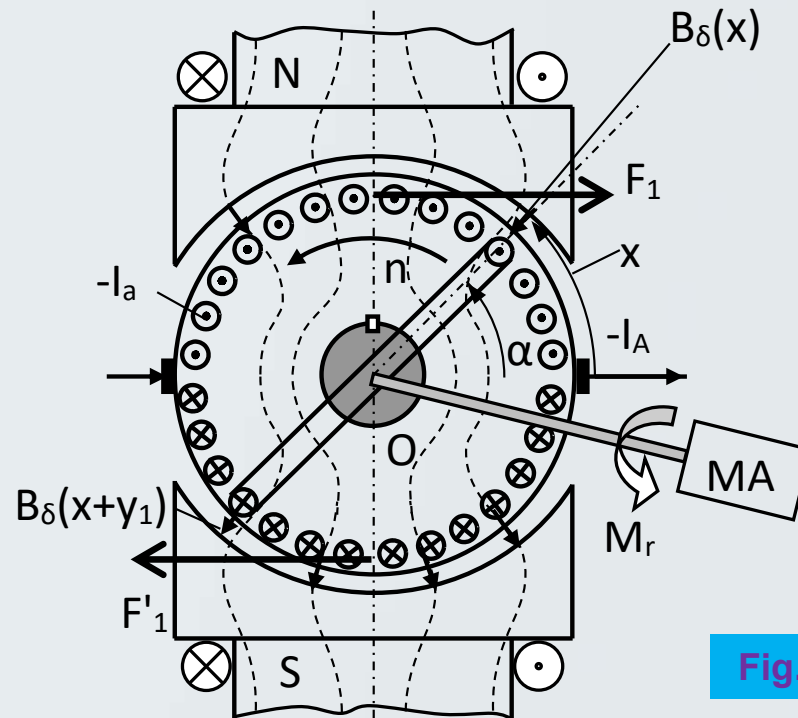


Fig.2



Expresia cuplului electromagnetic al mașinii de C.C.

In fig.2 se consideră aceeași structură de mașină de c.c. ca in fig.1. De această dată sunt luate in considerare toate secțiunile care sunt parcurse de curent. Sensul curentului este indicat cu „punct” și „x” după cum curentul iese sau intră in planul figurii (toate secțiunile dintr-o cale de curent sunt parcurse de curentul I_a cu un anumit sens).

Expresia generală de determinare a cuplului electromagnetic este:

$$M = \frac{dW_m}{d\alpha}$$

unde: W_m – energie magnetică a sistemului
 $d\alpha$ – coordonata unghiulară generalizată



Expresia cuplului electromagnetic al mașinii de C.C.

Notații:

I_A – curentul total (in înfășurarea rotorică)

I_a – curentul printr-o cale de curent;

$$I_a = \frac{I_A}{2a}$$

w_s – numărul de spire al fiecărei spire



Fluxul total al secției este

$$\Psi = w_s \cdot \varphi$$

$$\alpha \cdot R = x \quad \Rightarrow \quad d\alpha = \frac{1}{R} \cdot dx$$

Întrucât energia magnetică reprezintă produsul dintre flux și curent, atunci expresia cuplului electromagnetic corespunzător unei secții este:

$$M_{sectie} = (w_s \cdot \varphi) \cdot (I_a) \cdot \left(R \cdot \frac{d}{dx}\right)$$



Expresia cuplului electromagnetic al mașinii de C.C.

In aceleași ipoteze ca la deducerea tensiunii induse:

$$\varphi = \int_x^{x+y_1} B_{\delta_0}(x) \cdot l \cdot dx = [B_{\delta_0}(x + y_1) - B_{\delta_0}(x)] \cdot l \cdot dx$$

Expresia cuplului devine:

$$M_{sectie} = w_s \cdot R \cdot I_a \cdot l \cdot [B_{\delta_0}(x + y_1) - B_{\delta_0}(x)]$$

Considerând, din nou, pasul spirei egal cu pasul diametral, $y_1 = \tau$

avem $B_{\delta_0}(x) = -B_{\delta_0}(x + y_1)$

In consecința:

$$M_{sectie} = -2w_s \cdot R \cdot l \cdot I_a \cdot B_{\delta_0}(x)$$

Semnul minus indică faptul că sensul cuplului este contrar sensului ales pentru coordonata generalizată α



Expresia cuplului electromagnetic al mașinii de C.C.

Aplicând aceeași procedură de calcul al inducției $B_{\delta_0}(x)$ ca și în cazul tensiunii induse, se obține:

$$M_{\text{cale curent}} = -2w_s \cdot R \cdot l \cdot I_a \cdot \sum_{i=1}^k B_{\delta_0}(x) = -2w_s \cdot R \cdot l \cdot I_a \cdot k \cdot B_{\delta_{med}}$$

Expresia cuplului total, pentru toate cele $2a$ căi de curent din mașină, devine:

$$M = 2a \cdot M_{\text{cale curent}} = -4a \cdot w_s \cdot R \cdot l \cdot I_a \cdot k \cdot B_{\delta_{med}}$$



Expresia cuplului electromagnetic al mașinii de C.C.

Dar:

$$I_a = \frac{I_A}{2a}$$

$$k = \frac{N}{4a \cdot w_s}$$

$$2\pi R = 2p\tau \quad \text{adica } R = \frac{p\tau}{\pi}$$

Cuplul devine:

$$M = -4 \cdot a \cdot w_s \cdot \frac{p\tau}{\pi} \cdot l \cdot \frac{I_A}{2a} \cdot \frac{N}{4 \cdot a \cdot w_s} \cdot B_{\delta_{med}}$$



Expresia cuplului electromagnetic al mașinii de C.C.

Însă: $B_{\delta_{med}} \cdot l \cdot \tau = \phi$

Deci:

$$M = -\frac{p}{a} \cdot \frac{N}{2\pi} \cdot I_A \cdot \phi$$

sau:

$$M = k_m \cdot \phi \cdot I_A$$

unde k_m este o constantă constructivă:

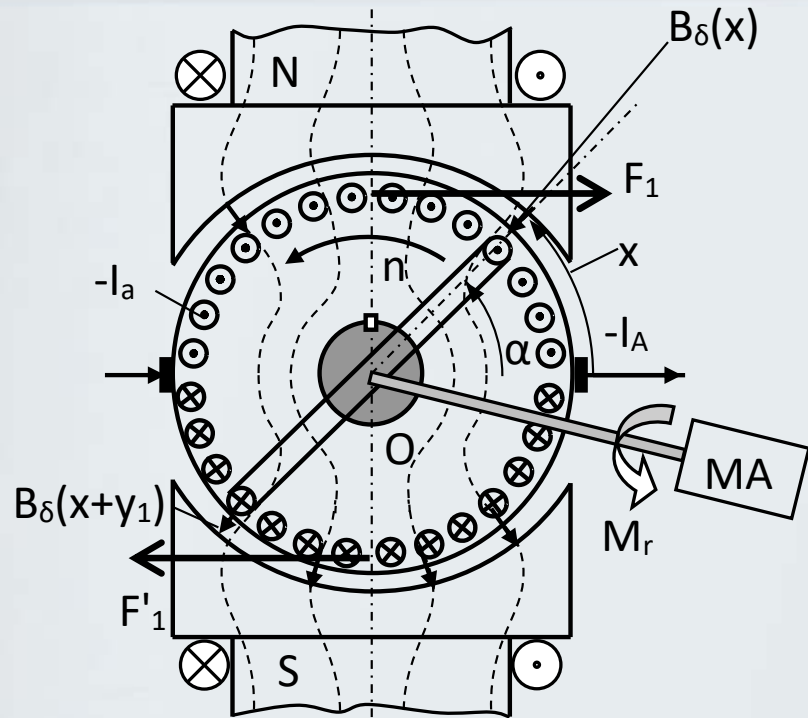
$$k_m = \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{2\pi}$$

iar:

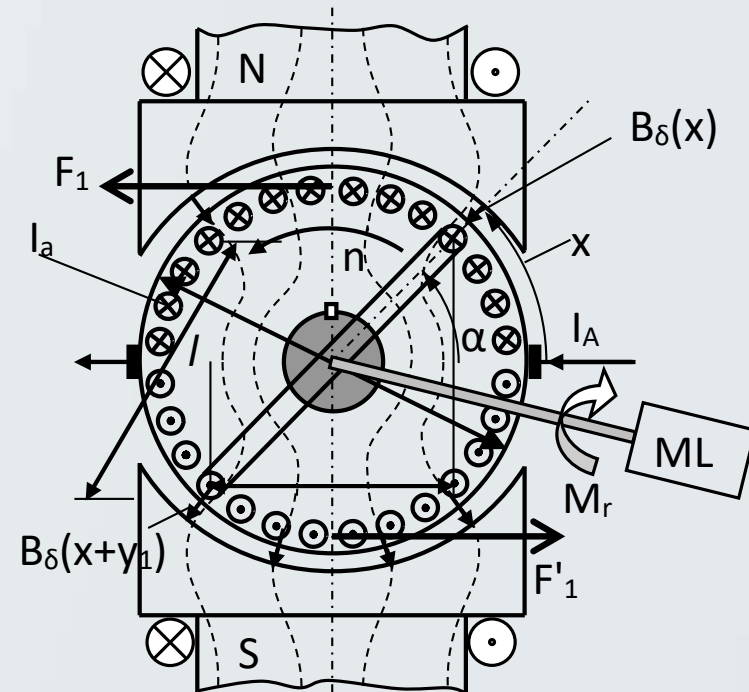
$$\frac{k_e}{k_m} = \frac{\frac{p}{a} \cdot \frac{N}{60}}{\frac{p}{a} \cdot \frac{N}{2\pi}} = \frac{\pi}{30}$$



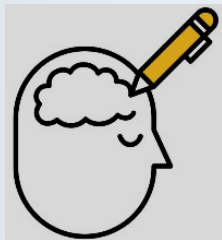
Expresia cuplului electromagnetic al mașinii de C.C.



Generator



Motor



La funcționarea în regim de **generator**, cuplul electromagnetic este în sens invers sensului de rotație al rotorului (se manifestă ca un cuplu de frânare).

La funcționarea în regim de **motor**, cuplul electromagnetic este în același sens cu sensul de rotație al rotorului (el determină rotirea rotorului).



Reacția indusului



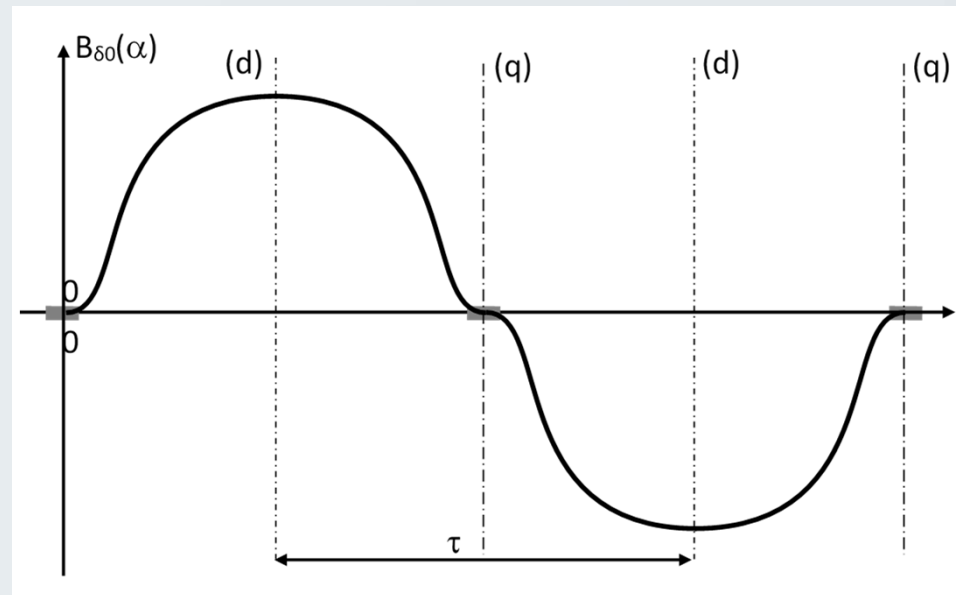
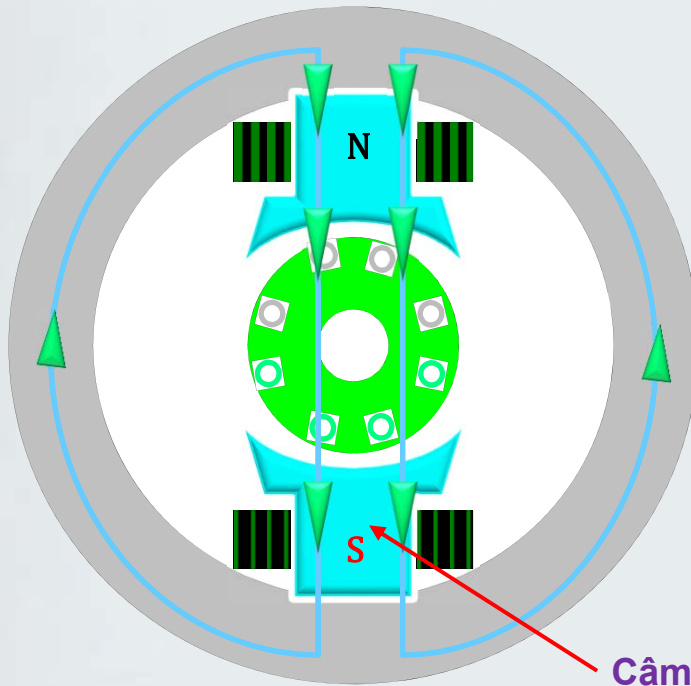
Reacția indusului desemnează toate fenomenele electromagnetice care au loc atunci când înfășurarea rotorică este parcursă de curent.

In înfășurarea rotorică apare curent electric atunci când mașina de c.c. funcționează in regim de generator in sarcină, motor sau frână.

Reacția indusului se datorează câmpului creat in mașina de c.c. de către curentul care circulă prin înfășurarea rotorică.



Reacția indusului

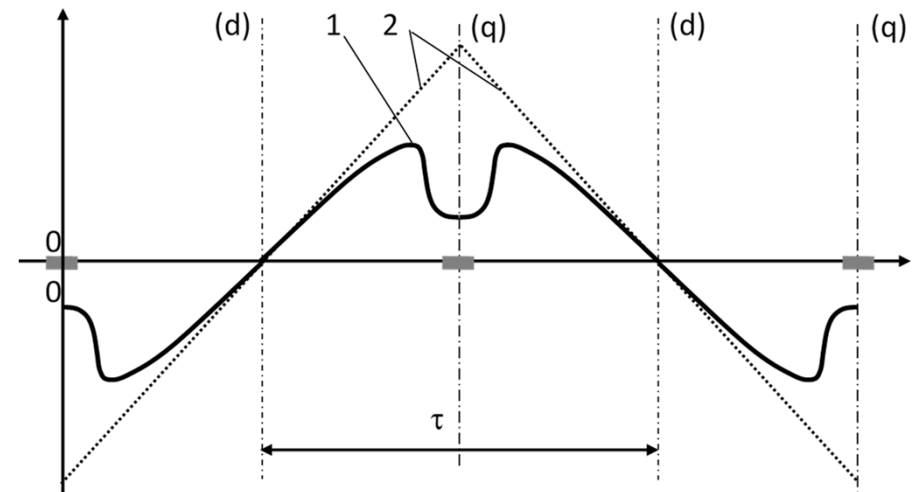
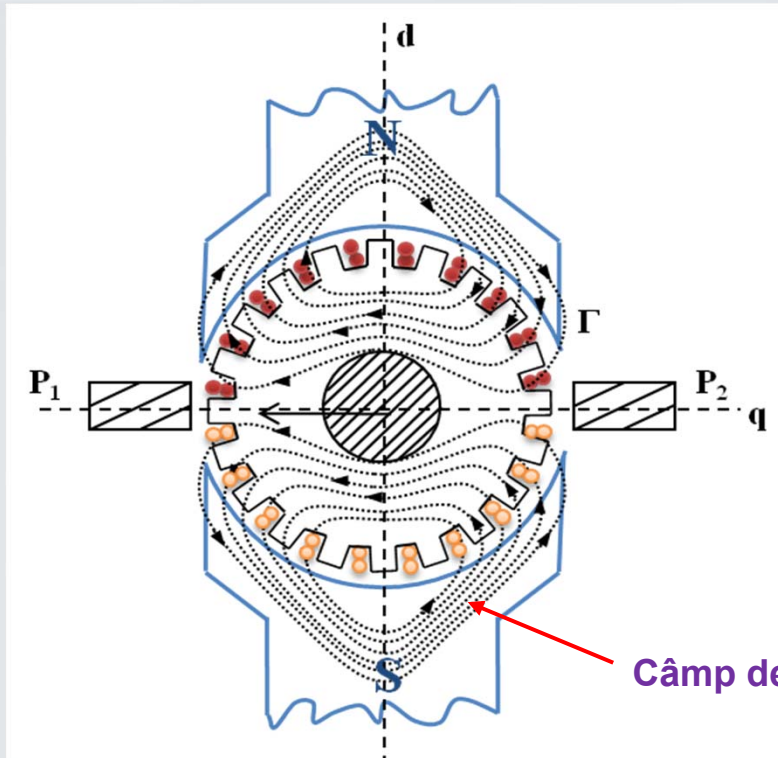


Atunci când înfășurarea de excitație este alimentată, ea creează câmpul inductor (sau câmpul de excitație), care reprezintă câmpul principal al mașinii.

Liniile de câmp ale câmpului inductor se închid pe axa polilor mașinii (axa longitudinală, d) și prin jugul statoric.



Reacția indusului



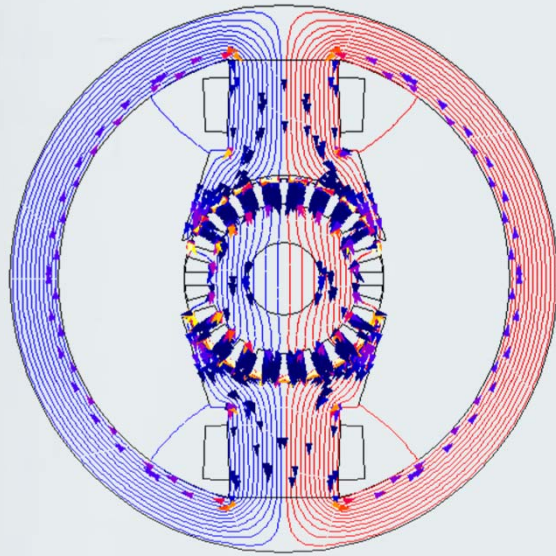
Când înfășurarea rotorică este parcursă de curent, ea creează un câmp ale cărei linii se închid după un traseu transversal față de polii inductori (de-a lungul axei interpolare, q , și prin piesele polare ale polilor principali).

Prezența acestui câmp se face puternic simțită în axa interpolară (axa periiilor), axă ce ar trebui să fie *neutră* din punct de vedere magnetic.

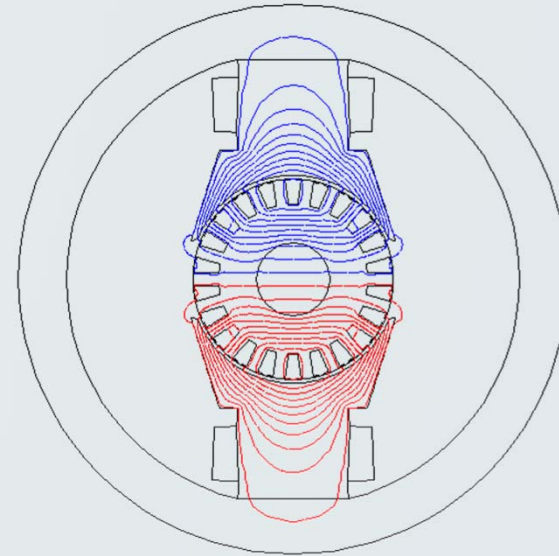
În figură este prezentată curba ideală a câmpului de reacție în întrefier (curba 2) și curba reală (curba 1).



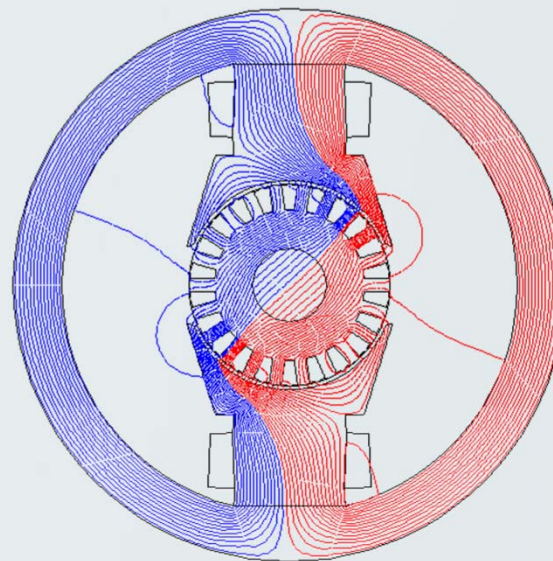
Reacția indusului



Câmp inductor



Câmp de reacție



Câmp rezultat



Reacția indusului

Existența celor două câmpuri în mașina de c.c. duce la compunerea acestora și apariția unui câmp rezultat.

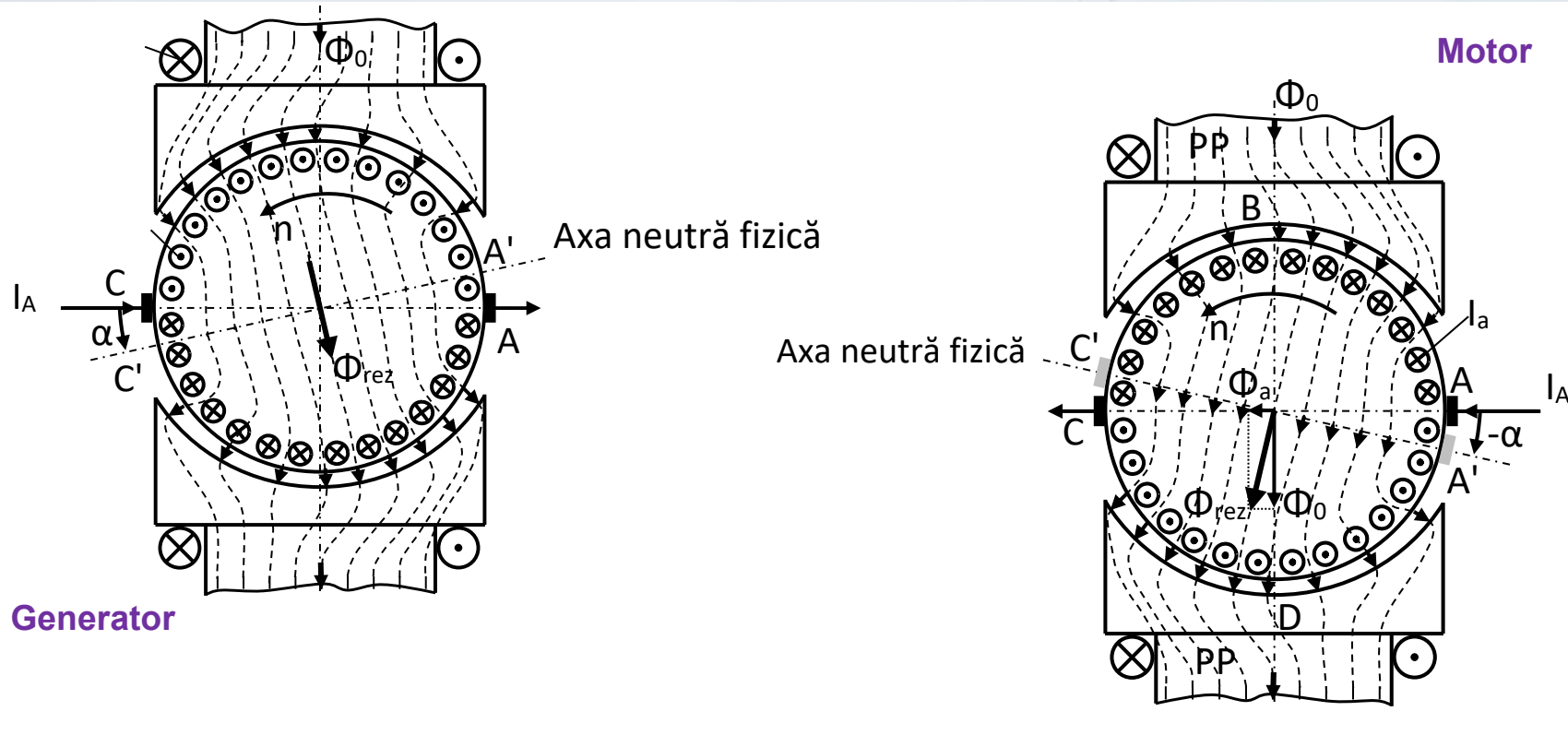
Întrucât pe o jumătate de pol inductor liniile celor două câmpuri sunt în același sens, iar pe cealaltă jumătate liniile de câmp au sensuri contrare, apare o „deformare” a câmpului rezultat din mașină care are ca rezultat:

- a) O distribuție neuniformă a inducției în miezul magnetic al polilor principali dar și în miezul magnetic al rotorului;
- b) O rotire a axei neutre a mașinii din axa periiilor cu un anumit unghi.

Ambele fenomene aduc probleme nedorite în funcționarea mașinii de c.c. Astfel, distribuția neuniformă a câmpului magnetic poate încălca circuitul magnetic, pe anumite porțiuni, până la saturație; de asemenea, rotirea axei neutre a mașinii înrăutățește condițiile de comutație.



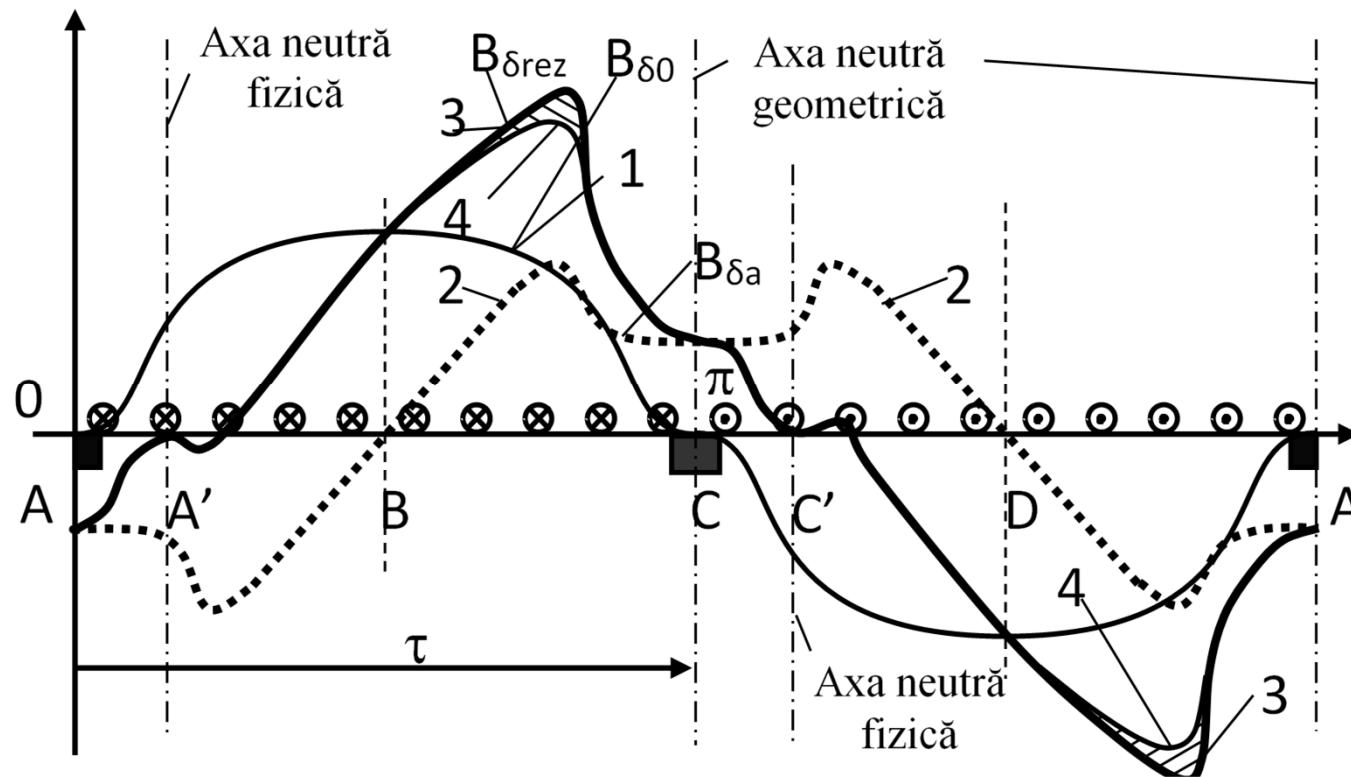
Reacția indusului



Rotirea axei neutre este diferită în funcție de regimul de funcționare a mașinii: la funcționarea în regim de generator, axa neutră se decalează cu un unghi α în sensul de rotație a rotorului. La funcționarea în regim de motor, axa neutră se decalează cu un unghi α în sens invers sensului de rotație a rotorului.



Reacția indusului

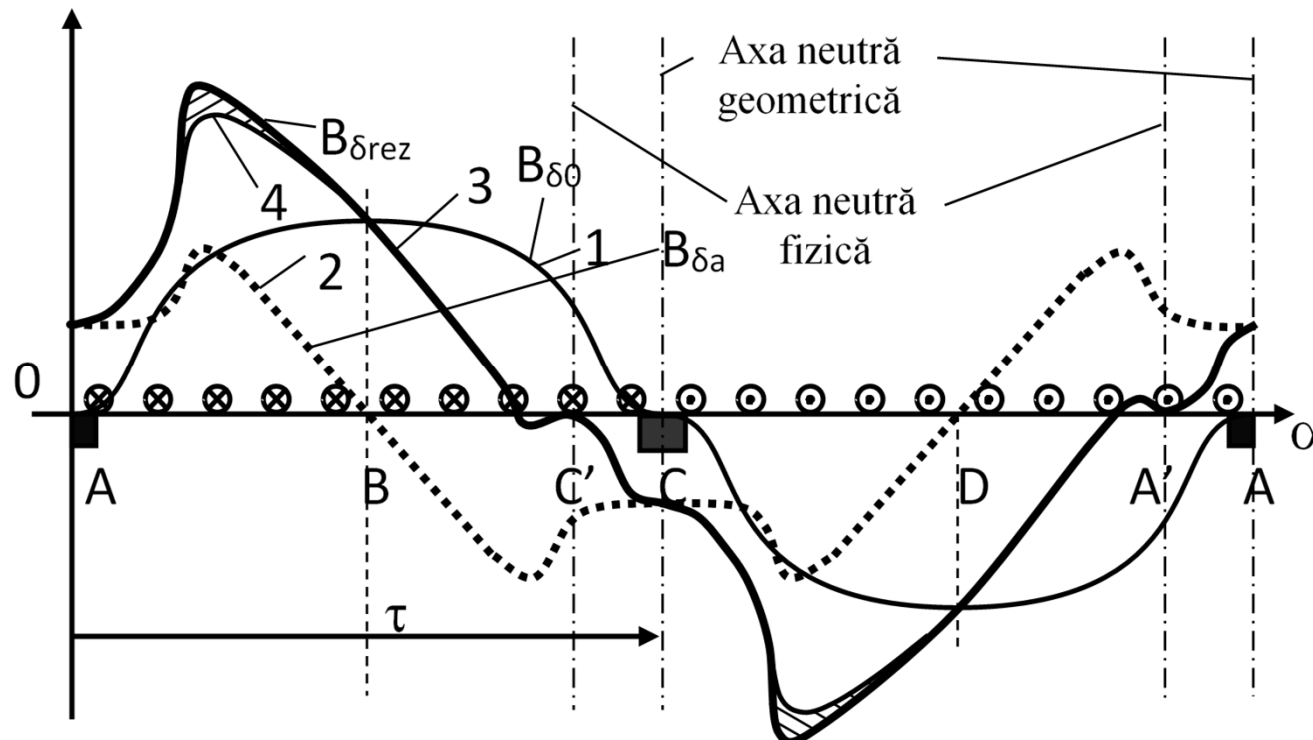


Câmpul
rezultant în
mașina de
c.c. în regim
de generator

- Curba 1 este curba inducției în întrefier determinată de câmpul inductor, $B_{\delta 0}$
- Curba 2 este curba inducției în întrefier determinată de câmpul de reacție, $B_{\delta a}$
- Curba 3 este curba rezultantă a inducției în întrefier obținută prin compunerea curbelor 1 și 2, $B_{\delta rez}$. Curba 4 apare doar dacă circuitul magnetic se saturează.



Reacția indusului



Câmpul
rezultant în
mașina de
c.c. în regim
de motor

- Curba 1 este curba inducției în întrefier determinată de câmpul inductor, $B_{\delta 0}$
- Curba 2 este curba inducției în întrefier determinată de câmpul de reacție, $B_{\delta a}$
- Curba 3 este curba rezultantă a inducției în întrefier, obținută prin compunerea curbelor 1 și 2, $B_{\delta rez}$. Curba 4 apare doar dacă circuitul magnetic se saturează.



Reacția indusului

Faptul că axa neutră se decalează din axa periiilor are consecințe extrem de nefavorabile asupra funcționării mașinii de c.c.

Reamintesc, atunci când calcă pe două lamele de colector, periiile realizează o scurtcircuitare a unei secții. Construcția înfășurării rotorice este realizată în așa fel încât, în momentul scurtcircuitării secției, laturile acesteia să se găsească în axa neutră a mașinii. Acest lucru este necesar pentru ca, în lipsa câmpului magnetic, să nu se inducă tensiuni în secție. Dacă s-ar induce tensiuni, atunci ar exista și curent prin secția respectivă, iar la părăsirea periei de pe lamele s-ar întrerupe scurtcircuitul și ar apărea (de regulă) scânteii. Prin urmare, este imperios necesar ca axa interpolară să rămână neutră din punct de vedere magnetic. Însă, reacția indusului strică întotdeauna această regulă.

Prezența scânteilor la perii duce la distrugerea prematură a periiilor și colectorului și respectiv scoatere din funcțiune a mașinii de c.c.



Reacția indusului



Pentru refacerea neutralității zonei interpolare se pot practica mai multe metode dintre care:

- Plasarea unor poli auxiliari in zonele interpolare care să creeze un câmp de polaritate opusă câmpului de reacție (este metoda cea mai folosită). Înfășurarea polilor auxiliari este conectată in serie cu înfășurarea rotorică astfel încât, orice modificare a câmpului de reacție odată cu sarcina să fie urmată si de modificarea câmpului polilor auxiliari.

- Plasarea unei înfășurări de compensație in piesele polare ale polilor principali care să creeze un câmp de polaritate opusă câmpului de reacție. Și această înfășurare este conectată in serie cu înfășurarea rotorică.



Cuvinte cheie

- ✓ Tensiune indusa
- ✓ Cuplu electromagnetic
- ✓ Reactia indusului

$$E = k_e \cdot n \cdot \phi$$

$$M = k_m \cdot \phi \cdot I_A$$



CURS 5

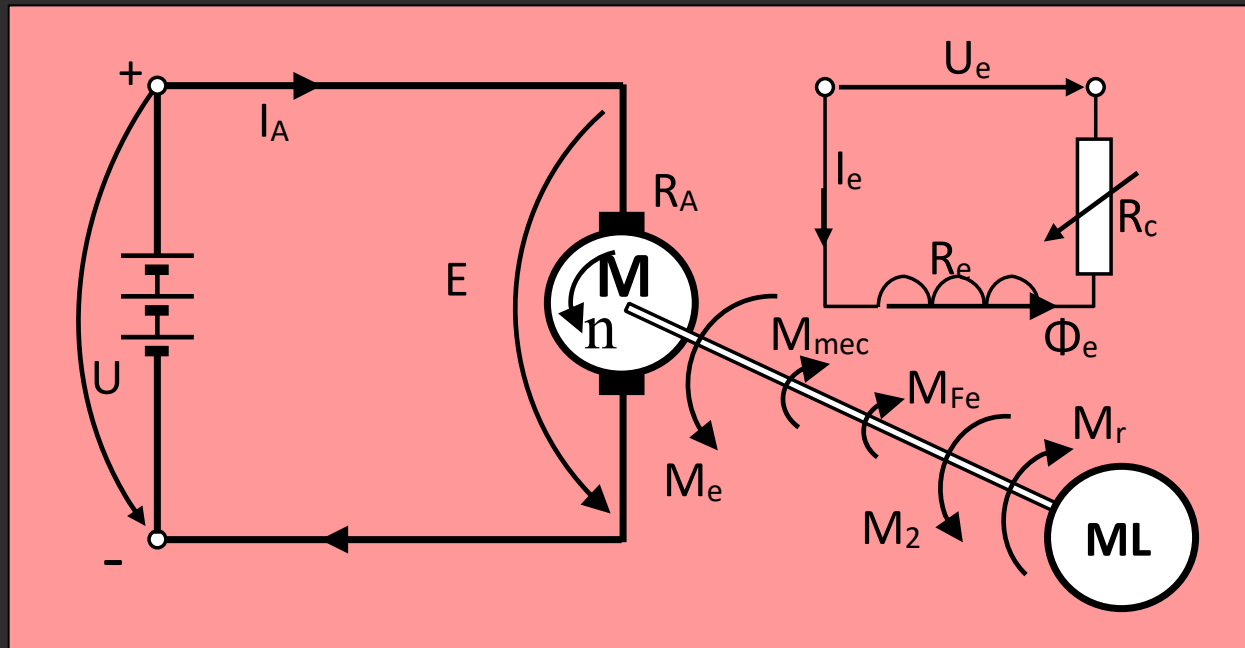
Funcționarea mașinii de c.c. în regim de motor



Cuprins

01 Caracteristici de pornire

02 Caracteristici de funcționare



Funcționarea mașinii de c.c. în regim de motor presupune că mașina primește energie electrică pe care o convertește în energie mecanică.

Prin urmare, mașina este alimentată de la o sursă de tensiune continuă U . Energia mecanică obținută la arbore este utilizată pentru antrenarea unei mașini de lucru, ML

Dacă mașina este cu excitație separată, este necesară o sursă de tensiune continuă și pentru alimentarea înfășurării de excitație.

La arborele (axul) mașinii electrice acționează o serie de cupluri, după cum urmează:

- Cuplul electromagnetic M_e dezvoltat de mașina de c.c. Acesta determină rotirea rotorului cu viteza n în sensul indicat pe figura.
- Cuplurile datorate pierderilor mecanice, M_{mec} și pierderilor în fierul rotorului M_{fe} .
- Cuplul rezistent M_r , determinat de mașina de lucru.

Ecuția de echilibru mecanic în regim dinamic este:

$$M_e - M_m - M_{Fe} - M_r = J \cdot \frac{d\Omega}{dt}$$

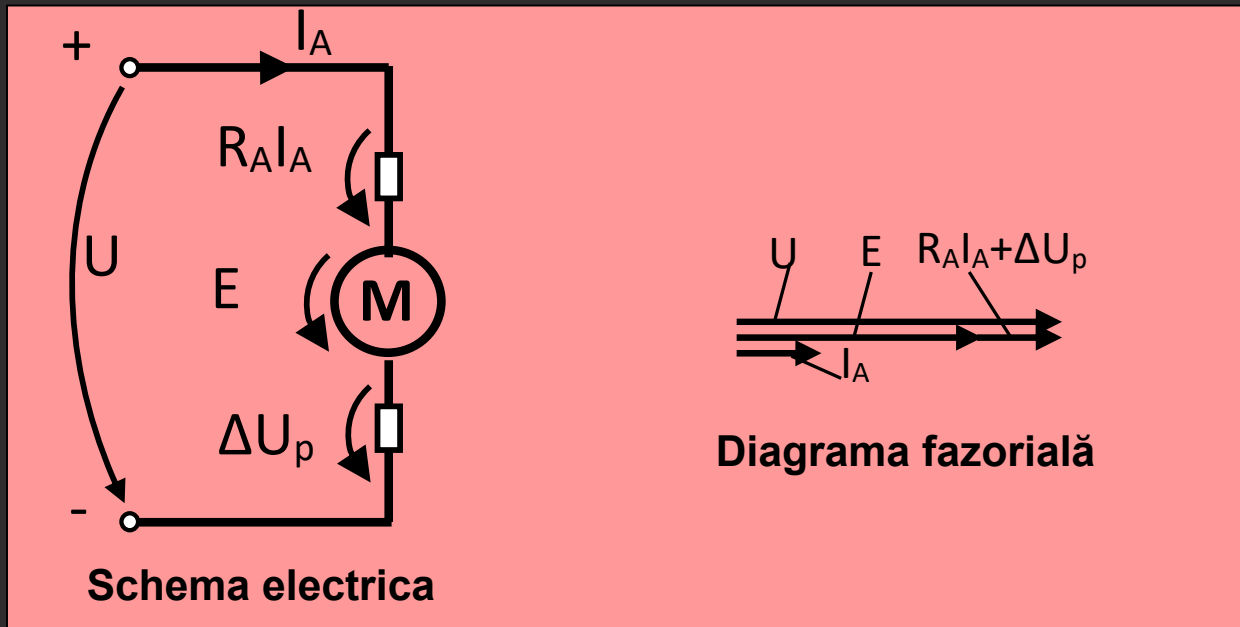
unde:

$$M_e = \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{2\pi} \cdot I_A \cdot \phi = k_m \cdot \phi \cdot I_A \quad \text{este expresia cuplului electromagnetic}$$

iar: $J \cdot \frac{d\Omega}{dt}$ reprezintă momentul de inerție al sistemului (m.c.c. + ML)

În regim stabilizat ($\Omega=ct$; adică la viteză constantă),
ecuația de echilibru a cuplurilor devine:

$$M_e = M_m + M_{Fe} + M_r$$



Schema electrică a motorului de c.c. pune în evidență următoarele elemente: tensiunea de alimentare, U ; curentul prin înfășurarea indusului, I_A ; tensiunea indusă în înfășurarea rotorică de către câmpul inductor conform legii inducției electromagnetice, E ; căderea de tensiune pe înfășurarea indusului, $R_A \cdot I_A$; căderea de tensiune la perii, ΔU_p .

$$E = -\frac{p}{a} \cdot \frac{N}{60} \cdot n \cdot \phi = -k_e \cdot n \cdot \phi$$

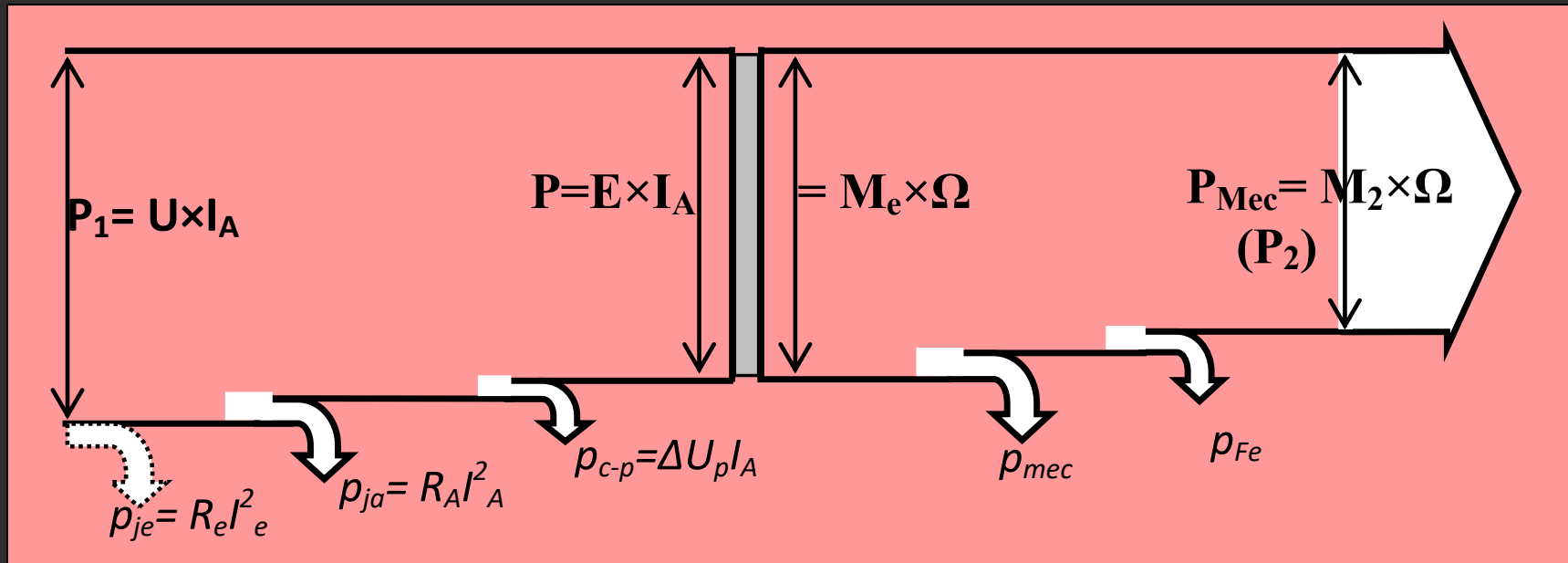
- Expresia tensiunii induse

$$U_A = E + R_A \cdot I_A + \Delta U_p$$

- Ecuația de echilibru al tensiunilor

DIAGRAMA DE BILANȚ ENERGETIC

Această diagramă exprima echilibrul puterilor în mașina de c.c. în regim de motor.



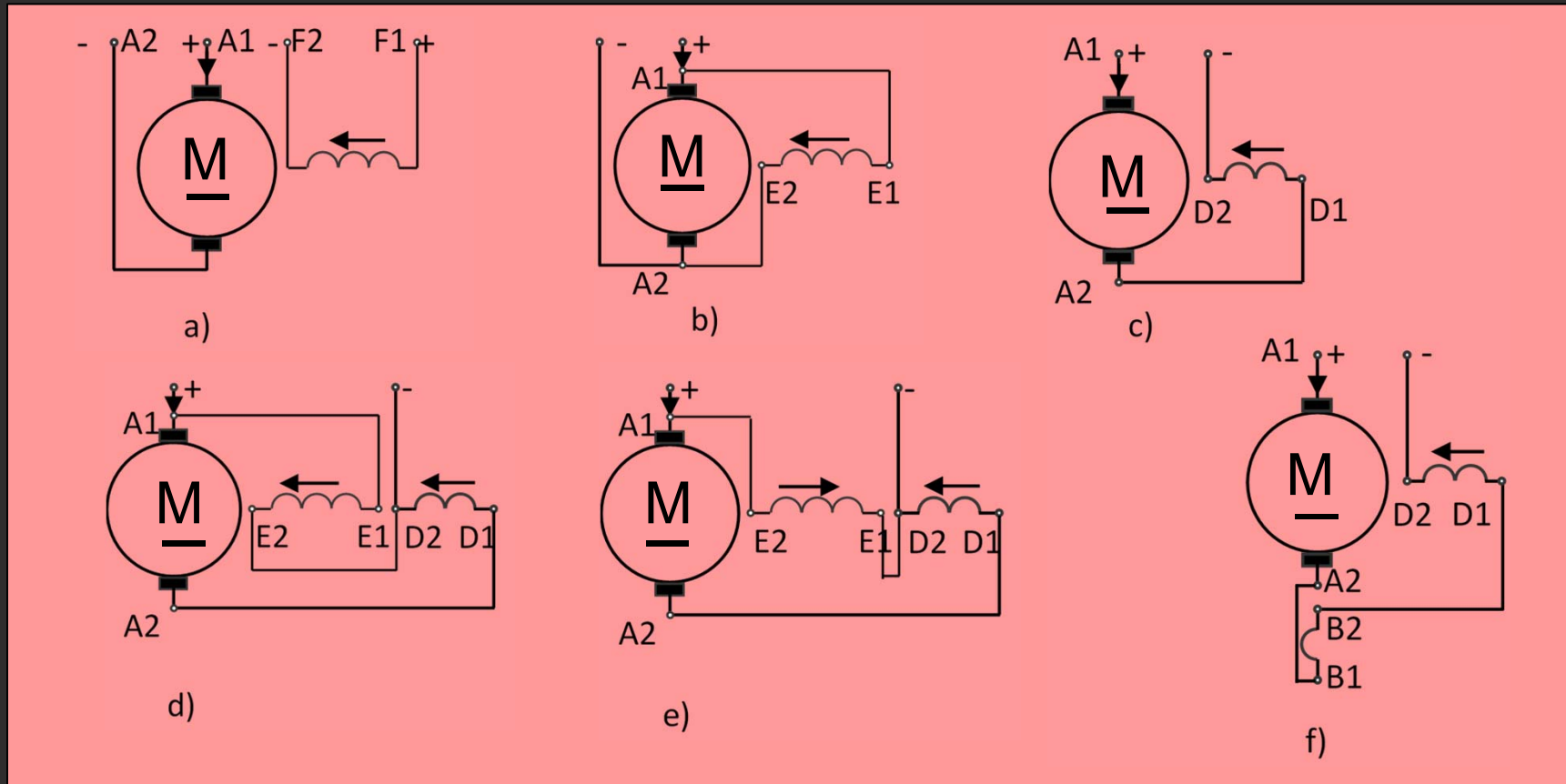
- P_1 – puterea absorbită (putere electrică)
- P – puterea electromagnetică
- P_2 – puterea cedată (putere mecanică)

- p_{je} – pierderi în înfășurarea de excitație
- p_{ja} – pierderi în înfășurarea rotorică
- p_{c-p} – pierderi la contactul perie colector
- p_{mec} – pierderi mecanice și de ventilație
- p_{Fe} – pierderi în fier (în miezul rotoric)

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum p}{P_1}$$

$$\sum p = p_{je} + p_{ja} + p_{c-p} + p_{mec} + p_{Fe}$$

CLASIFICAREA MAȘINILOR DE C.C. DUPĂ TIPUL EXCITAȚIEI



Simbolizarea motoarelor de c.c.

a) Motor – excitație separată; b) Motor – excitație derivație; c) Motor – excitație serie; d) Motor - excitație mixt adițională; e) Motor - excitație mixt diferențială; f) Motor – excitație serie + poli auxiliari.

Caracteristicile motoarelor de c.c.

Caracteristici de pornire

Caracteristici de funcționare

Caracteristici de reglare a vitezei

Caracteristici de frânare

I. Caracteristici de pornire

Studiul pornirii motorului de c.c. are in vedere următoarele aspecte:



Determinarea metodei de pornire, a aparatajului utilizat și a economicității din punctul de vedere a energiei disipate



Variația cuplului de pornire M_p și determinarea raportului M_p/M_n



Variația in timp a curentului de pornire și determinarea raportului I_p/I_n

Ecuția de tensiuni a motorului de c.c. , negliând căderea de tensiune la perii, ΔU_p , este:

$$U_A = E + R_A \cdot I_A = k_e \cdot n \cdot \phi_0 + R_A \cdot I_A$$

Întrucât la pornire viteza rotorului este zero ($n=0$), rezultă că expresia curentului prin înfășurarea rotorului este:

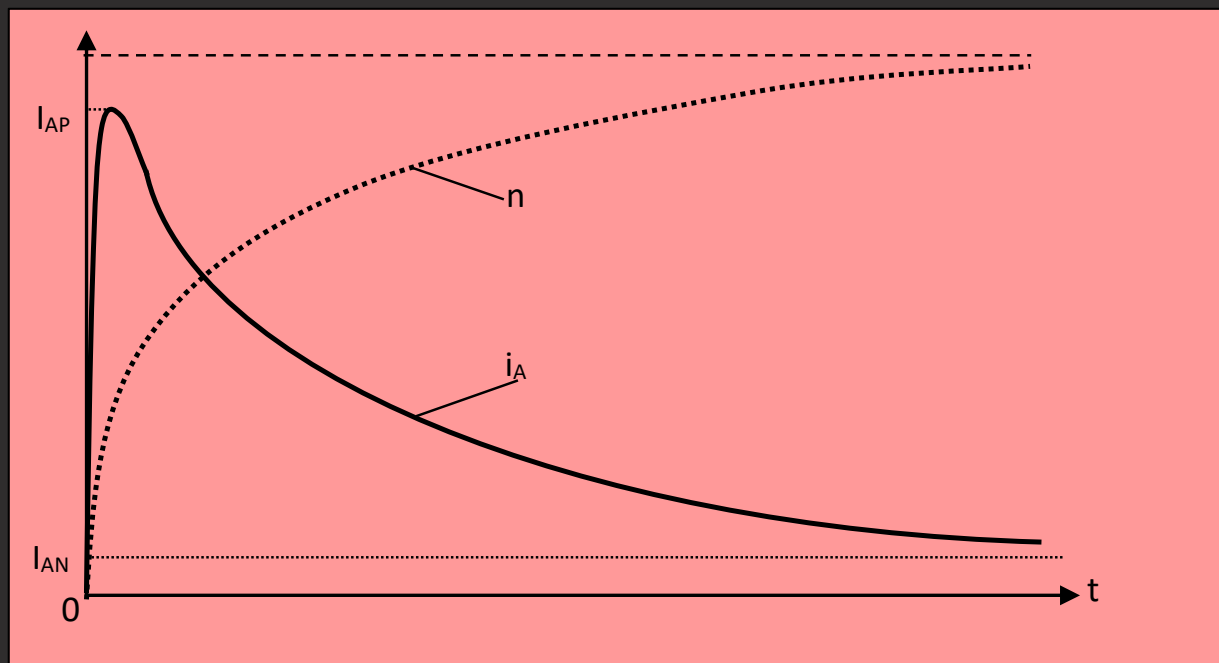
$$I_{Ap} = \frac{U_A}{R_A} + L_A \frac{di_A}{dt}$$

Componenta încercuită apare numai când curentul variază prin înfășurarea rotorică deci și pe perioada regimului tranzitoriu de pornire. Această componentă are o valoare mică și poate fi neglijată.

Cu alte cuvinte, la pornire, curentul prin indus este limitat doar de rezistența înfășurării rotorice, a cărei valoare este foarte mică. Drept urmare, la pornirea motorului de c.c., curentul poate lua valori foarte mari :

$$I_{Ap} = (10 \dots 20)I_A$$

Variația curentului prin indus și a turației rotorului pe perioada pornirii motorului de c.c.



La pornire, curentul I_A crește brusc până la o valoare maximă după care, odată cu accelerarea rotorului și apariția tensiunii induse (E) în înfășurarea rotorică, începe să scadă până la o valoare determinată de valoarea sarcinii motorului (între valoarea de mers în gol și valoarea nominală).

Pornirea este diferită la motorul de c.c. în funcție de tipul excitației.

La motoarele cu excitație separată și derivație:

- a) Este indicat ca excitația să fie alimentată înaintea alimentării înfășurării rotorice. Astfel mașina va avea fluxul inductor necesar dezvoltării unui cuplu de pornire semnificativ;**
- b) Trebuie avut grijă ca, în cazul în care există un reostat de reglaj pe circuitul de excitație, acesta să fie poziționat pe o valoare relativ mică (curentul de excitație să aibă valoarea nominală) astfel încât fluxul inductor să fie semnificativ și să existe un cuplu mare de pornire ($M = k_m \cdot \Phi \cdot I_A$)**

La motoarele cu excitație serie:

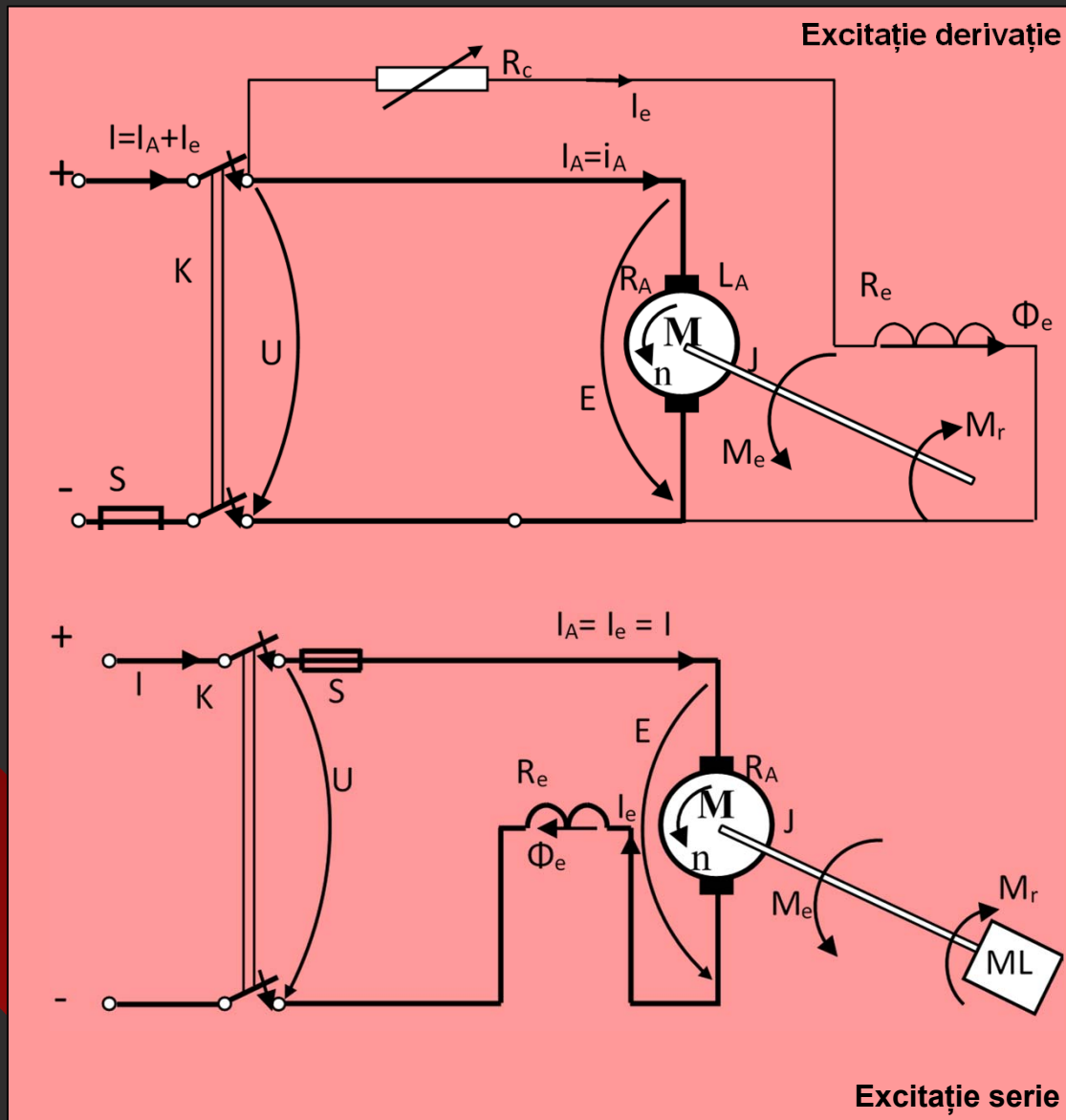
- a) Deoarece curentul de excitație coincide cu curentul prin înfășurarea indusului, motorul serie pornește mai repede, întrucât dezvoltă un cuplu mai mare.**

Prezența curentului mare la pornire poate avea efecte nedorite asupra motorului de c.c. Astfel, valoarea mare a curentului, chiar dacă nu determină „arderea” imediată a înfășurării rotorice, duce la deteriorarea prematură a acesteia. De asemenea, valorile mari ale curentului, ce determină valori mari ale cuplului de pornire ($M_p = k_m \cdot \phi \cdot I_{ap}$), determină solicitări nedorite ale cuplajului dintre motor și mașina de lucru.

Pentru evitarea acestor efecte și având în vedere expresia curentului de pornire ($I_{ap} = U_A / R_A$) se utilizează următoarele tipuri de pornire:

- a) Pornirea directă
- b) Pornirea cu reostat înseriat în circuitul indusului
- c) Alimentarea cu tensiune variabilă

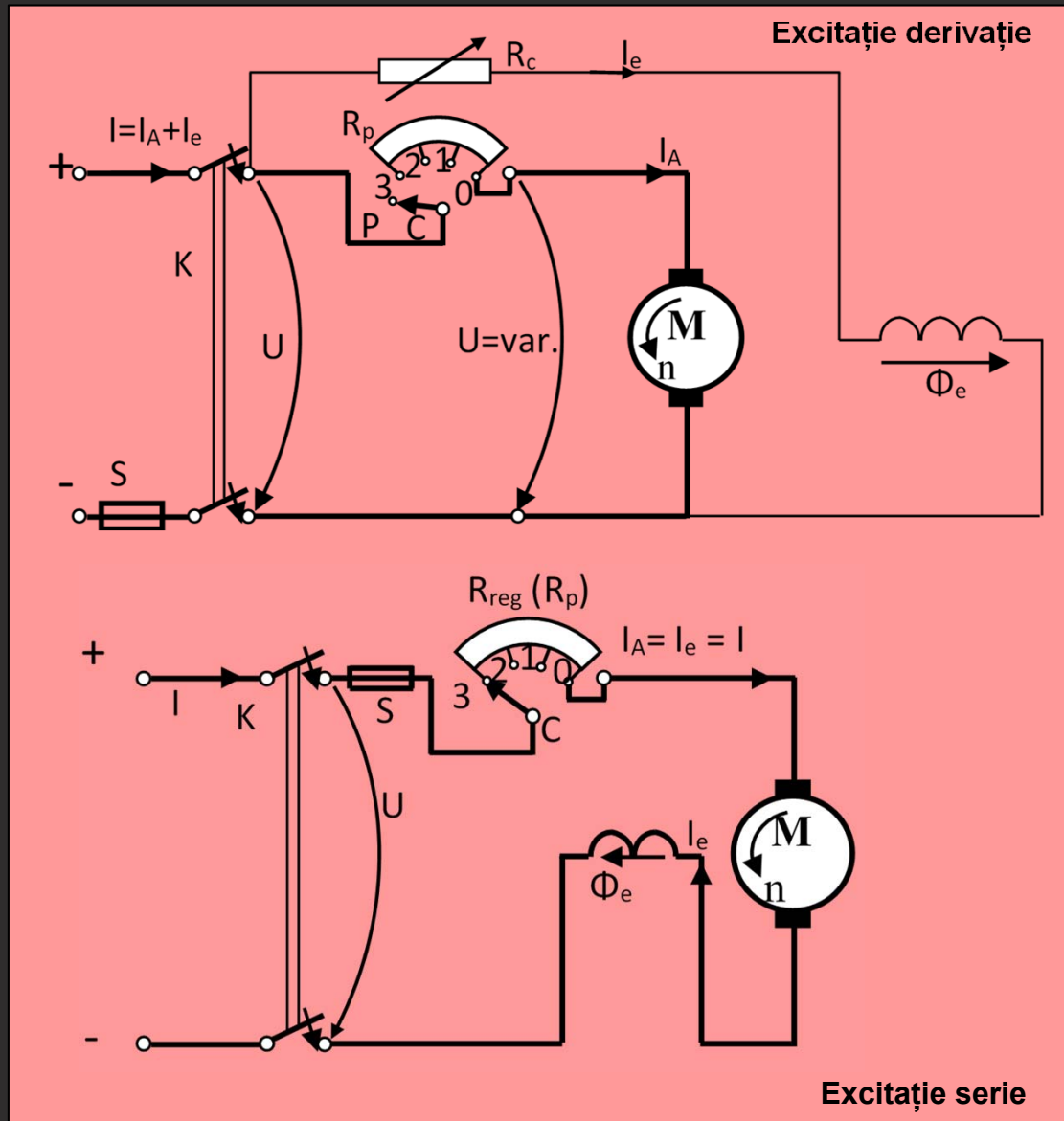
1. Pornirea directă



În cazul motoarelor de mică putere (până în 5kW) și la care pornirile nu sunt dese, se acceptă conectarea directă la tensiunea de alimentare.

Curentul de pornire atinge valori de $(6 \div 8)I_N$.

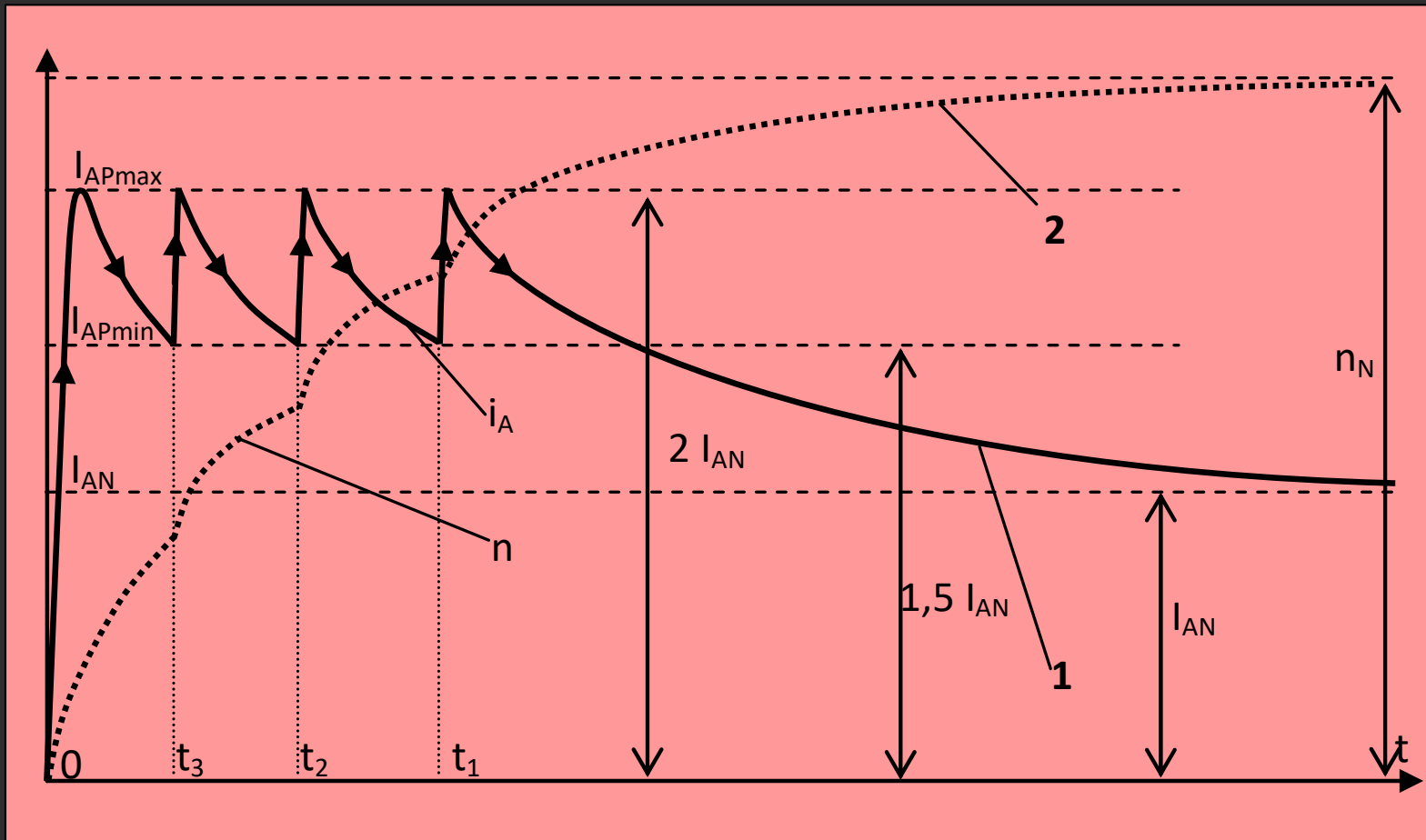
2. Pornirea cu reostat



Limitarea curentului se face prin înserierea unei rezistențe variabile în circuitul înfășurării rotorice. În acest fel, curentul de pornire are expresia:

$$I_p = \frac{U}{R_A + R_p}$$

Calculul reostatului de pornire (R_p) este făcut în așa fel încât valoarea curentului de pornire să se încadreze în plaja de valori $(1,5 \div 2)I_N$.



Curba 1 – variația curentului de pornire folosind un reostat cu ploturi (reostat la care variația rezistenței se face în trepte de pe un plot pe altul)

Curba 2 – variația vitezei pe perioada pornirii

Inițial, reostatul de pornire este plasat pe poziția 3, ce corespunde valorii maxime. La cuplare, curentul crește brusc, până la o valoare maximă ce nu depășește $2I_N$. Apoi începe să scadă odată cu accelerarea rotorului.

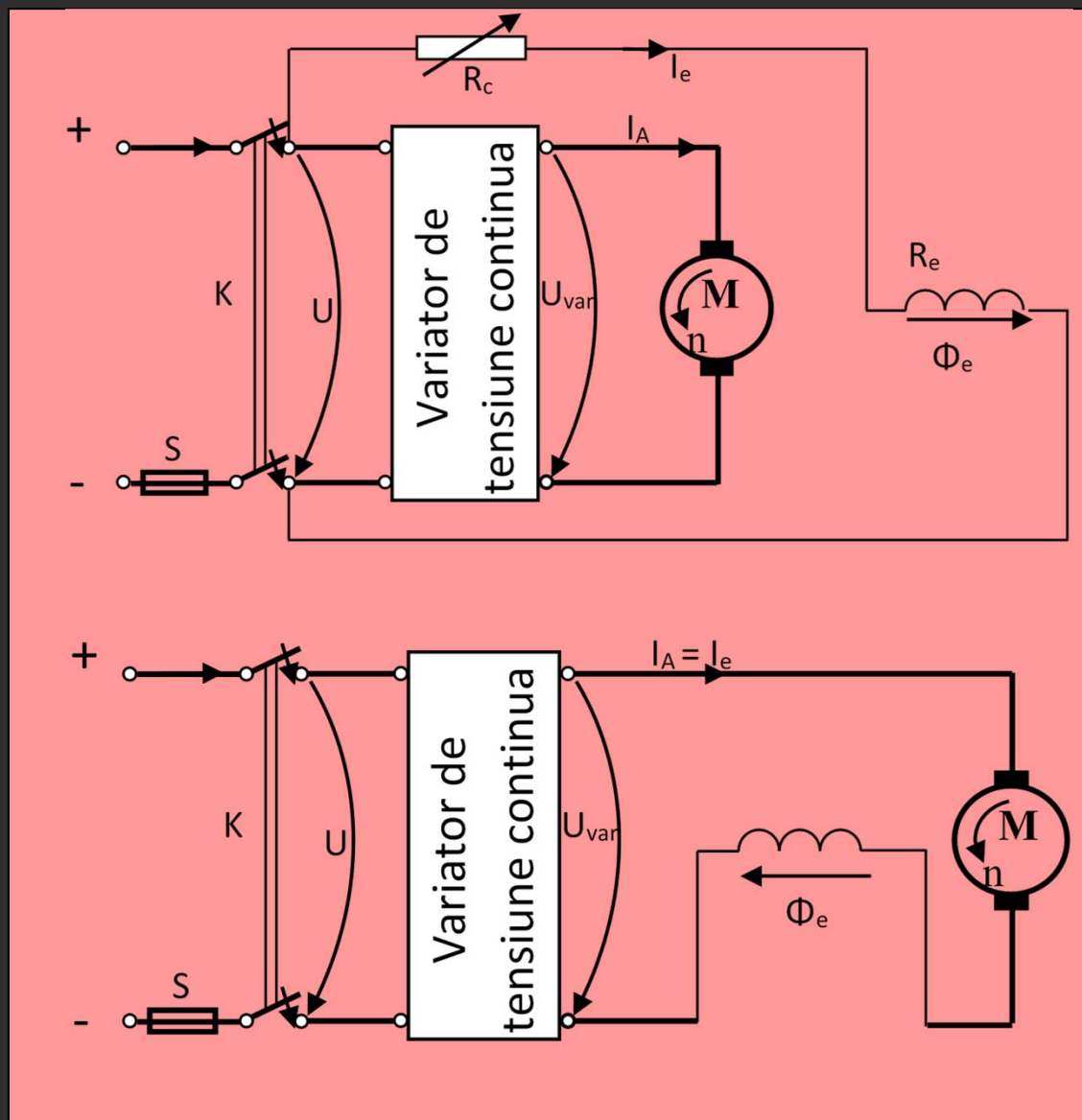
În momentul când curentul atinge o valoare minimă (de exemplu $1,5I_N$), se mută reostatul pe poziția 2 (scade rezistența de pornire). Curentul crește din nou până la valoarea maximă, după care scade din nou.

Se trece apoi pe poziția 1 și în final se scurtcircuitază complet, eliminând-se astfel rezistența de pornire din circuit.



Reostatul de pornire NU are voie să rămână conectat în circuit după perioada pornirii. El este dimensionat pentru un timp scurt de funcționare.

3. Alimentarea cu tensiune variabilă



Pornirea motorului se face prin alimentarea cu tensiune redusă, ce duce evident la reducerea curentului.

În cazul motorului cu excitație derivație, trebuie avut grijă ca excitația să fie alimentată cu tensiunea nominală.

În cazul motorului cu excitație serie, reducerea tensiunii la pornire înseamnă și un flux de excitație mai mic, ceea ce determină un cuplu de pornire mult mai mic.

II. Caracteristici de funcționare

Exprimă relațiile dintre principalele mărimi ce caracterizează funcționarea motorului: turație (n), cuplu (M), curent absorbit (I), randament (η), putere cedată (P_2) în condițiile în care tensiunea de alimentare se păstrează constantă și, de asemenea, rezistențele din circuitul indusului și circuitul de excitație.



Caracteristica de
viteză:
 $n=f(I_e)$

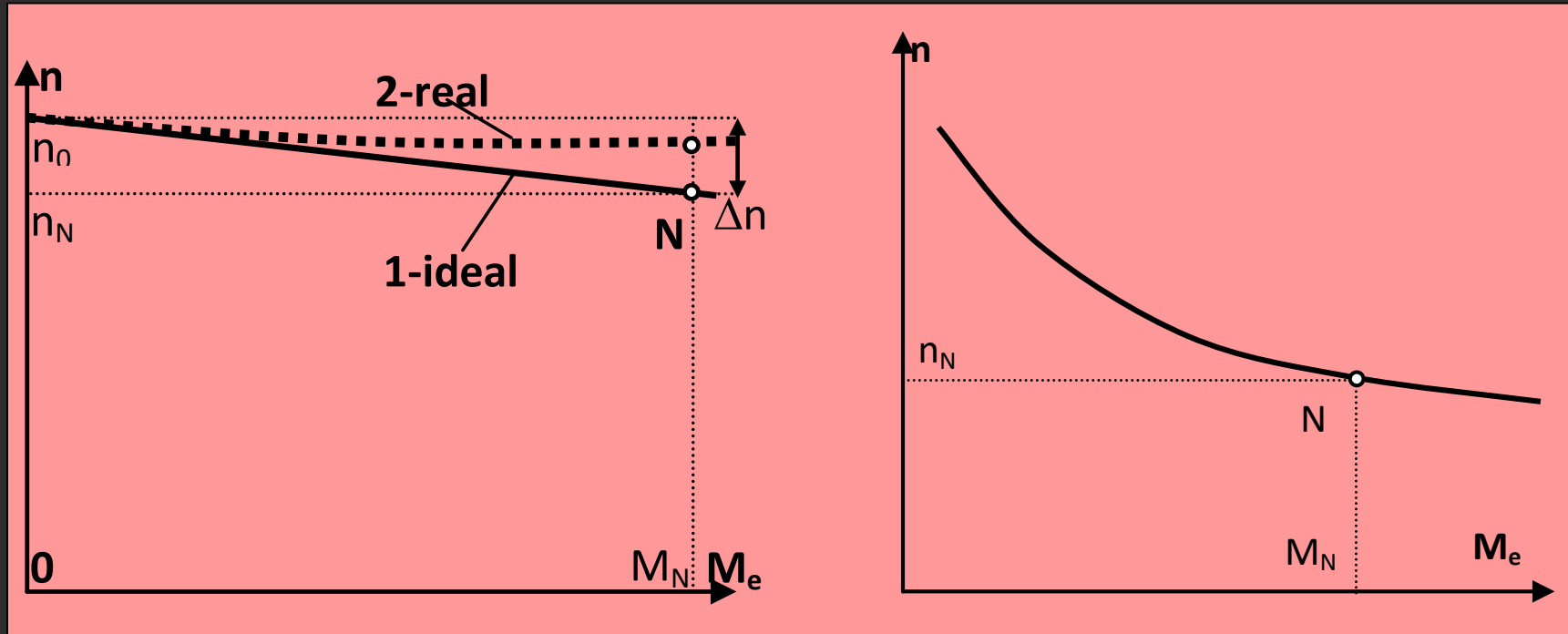


Caracteristica
mecanică:
 $n=f(M_2)$



Caracteristici
de funcționare
propriu-zise:
 $n=f(P_2);$
 $M=f(P_2);$
 $\eta=f(P_2)$

Caracteristica mecanica



MCC cu excitație derivație

MCC cu excitație serie

Caracteristica mecanică arată modul în care se modifică viteza motorului de c.c. atunci când variază cuplul rezistent la arbore.

Expresia turației, dedusă din ecuația de tensiuni, este:

$$n = \frac{U_A - R_A \cdot I_A}{k_e \cdot \phi} = \frac{U_A}{k_e \cdot \phi} - \frac{R_A \cdot I_A}{k_e \cdot \phi} = n_0 - \frac{R_A \cdot I_A}{k_e \cdot \phi}$$

Întrucât expresia cuplului este:

$$M = k_m \cdot \phi \cdot I_A$$

rezultă că:

$$n = n_0 - \frac{R_A}{k_e \cdot k_m \cdot \phi^2} \cdot M$$

unde n_0 reprezintă turația de mers la gol (cuplul rezistent este nul).

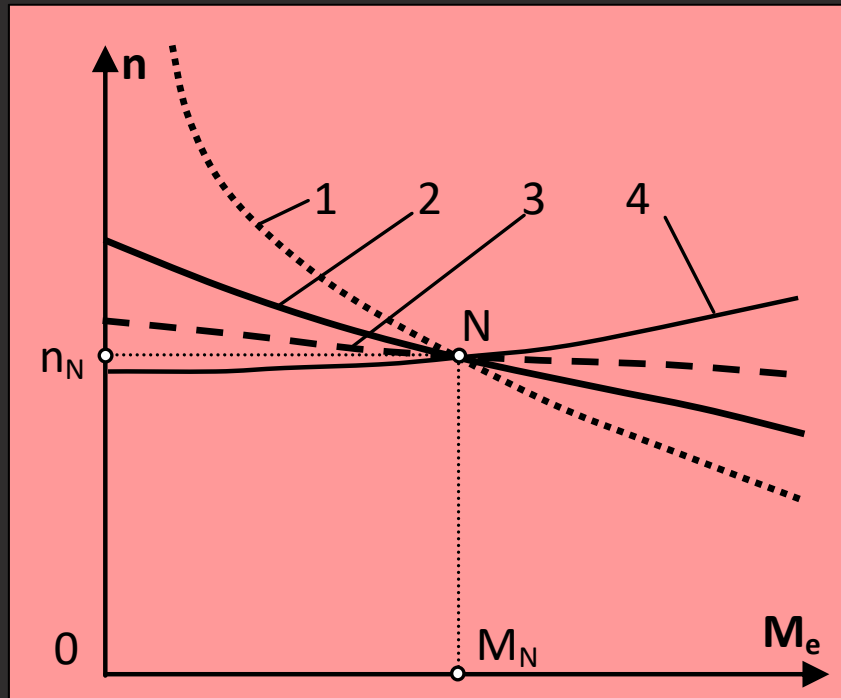
*La mașina cu excitație derivație (separată): pe măsură ce cuplul rezistent crește, turația scade. Scăderea turației este relativ mică. Se spune ca motorul de c.c. cu excitație derivație are o *caracteristica mecanica rigida*.*

- ✓ Față de caracteristica 1 (caracteristica ideală), caracteristica 2 arată modul real de variație a turației. Aceasta scade pe o porțiune după care, datorită intensificării reacției indusului (ce modifică fluxul Φ), turația se menține constantă sau chiar poate crește ușor.
- ✓ Punctul de funcționare N reprezintă punctul nominal de funcționare – corespunde puterii indicate pe plăcuța indicatoare a mașinii.
- ✓ Δn reprezintă căderea de turație: $\Delta n = n_0 - n_N$

La mașina cu excitație serie: odată cu creșterea cuplului rezistent la arbore are loc o scădere pronunțată a vitezei motorului de c.c. Se spune că motorul de c.c. cu excitație serie are o *caracteristică mecanică căzătoare (sau suplă)*.

Se poate demonstra matematic faptul că, forma caracteristicii mecanice în zona de funcționare „gol-nominal” este hiperbolică. Peste valoarea nominală, când apare saturația circuitului magnetic, scăderea turației devine liniară.

Funcționarea motorului de c.c. cu excitație serie are o particularitate ce se poate vedea și pe caracteristică: caracteristica mecanică NU intersectează axa ordonatelor, iar valoarea turației crește spre valori inadmisibile atunci când cuplul la arbore scade spre zero. Din acest motiv, motorul de c.c. cu excitație serie NU are voie să rămână în gol, întrucât turația crește până mașina cedează din punct de vedere mecanic. Este fenomenul cunoscut sub numele de „ambalarea motorului de c.c.”. Acest lucru se explică ușor: întrucât curentul prin excitație este același cu curentul prin indus, atunci când mașina este la gol, fluxul de excitație scade foarte mult și, drept urmare, turația crește foarte tare.



1 – Excitație serie

2 – Excitație mixt adițional

3 – Excitație derivație

4 – Excitație mixt diferențial

In cazul motorului de c.c. cu **excitație mixtă**, unde există atât înfășurări de excitație serie cât și derivație, se pot realiza două tipuri de funcționare, in funcție de modul in care sunt create fluxurile de excitație:

- Funcționare mixt adițional – fluxurile de excitație se adună;
- Funcționare mixt diferențial – fluxurile de excitație se scad.

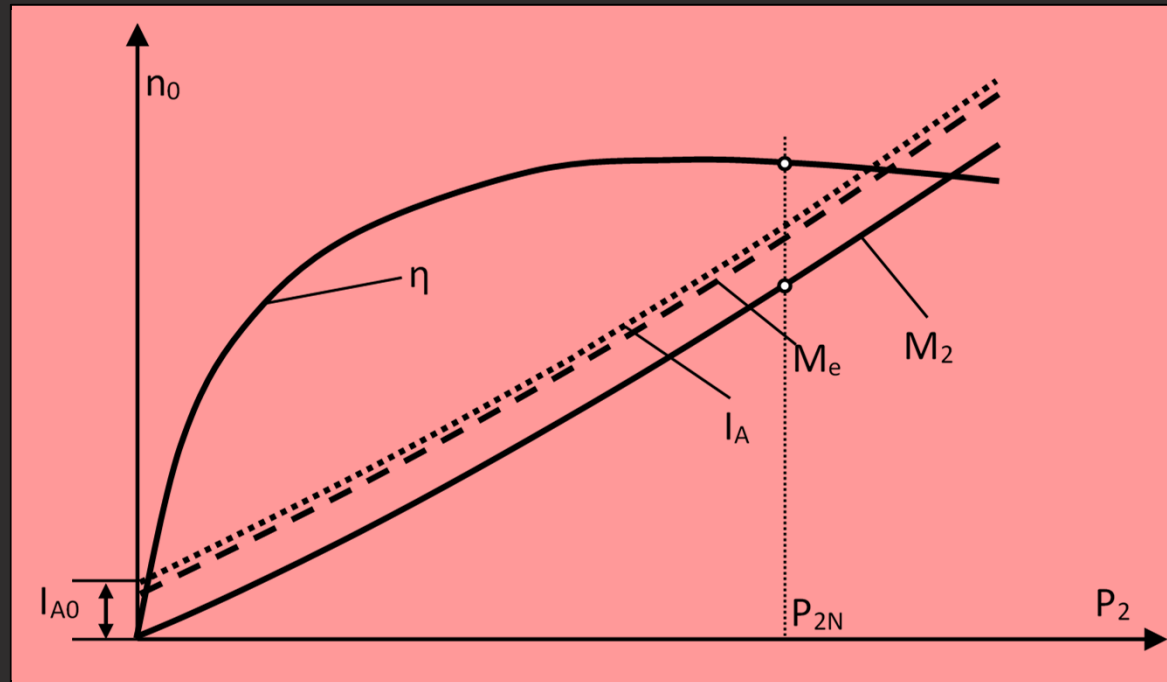
$$n = \frac{U_A - R_A \cdot I_A}{k_e \cdot (\phi_{deriv} \pm \phi_{serie})}$$

Funcționarea tip mixt adițional – caracteristica 2. Este o caracteristică mai căzătoare decât cea a motorului derivație, dar la care se elimină pericolul ambalării, specific motorului serie.

Fluxurile create de cele două tipuri de excitație nu sunt, de regulă, egale. Atunci când este predominant fluxul serie, caracteristica mecanică este mai căzătoare. Practic, caracteristica mecanică se situează între cea derivație și cea serie și se apropie mai mult de acea caracteristică a cărei înfășurare dă fluxul predominant.

Funcționarea tip mixt diferențial – caracteristica 4. Este o caracteristică la care, odată cu creșterea cuplului rezistent la arbore, are loc și o creștere a vitezei motorului. Acest lucru se datorează faptului că are loc o descreștere a fluxului rezultat în mașină.

Funcționarea de tip mixt diferențial în regim de motor este, de regulă, evitată, întrucât funcționarea este instabilă (au loc variații necontrolate ale vitezei) .

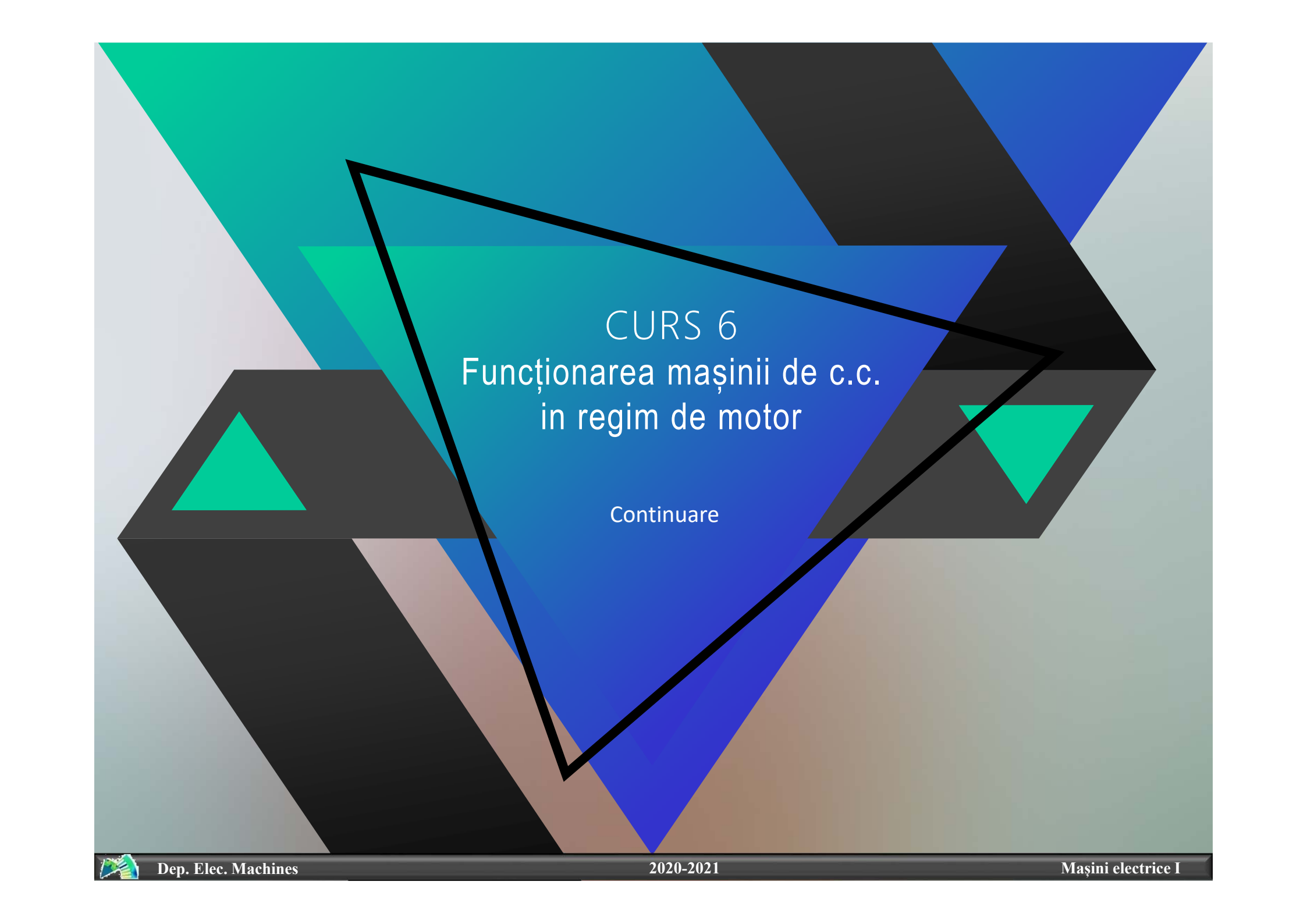


Aceste caracteristici exprimă comportarea și performanțele motorului de c.c. Sunt trasate, de regulă, în funcție de puterea utilă, P_2 .

$$\eta=f(P_2); M_e=f(P_2); M_2=f(P_2); I_A=f(P_2);$$



- ✓ *Curent de pornire*
- ✓ *Metoda de pornire*
- ✓ *Cuplu de pornire*
- ✓ *Caracteristica mecanica*



CURS 6
Funcționarea mașinii de c.c.
in regim de motor

Continuare



Cuprins:

I.
Reglarea vitezei
motorului de
c.c.

II.
Frânarea
motorului de
c.c.

I. Caracteristici de reglare a vitezei

Reglarea vitezei motorului de c.c. are in vedere următoarele aspecte:

a. Domeniul de reglare a vitezei dat de raportului n_{\max}/n_{\min}

b. Modul de reglare a vitezei (continuu sau in trepte)

c. Determinarea metodei de pornire, a aparatajului utilizat si a economicității din punctul de vedere a energiei disipate

Expresia turației la motorul de c.c. este:

$$n = \frac{U_A - R_A \cdot I_A}{k_e \cdot \phi}$$

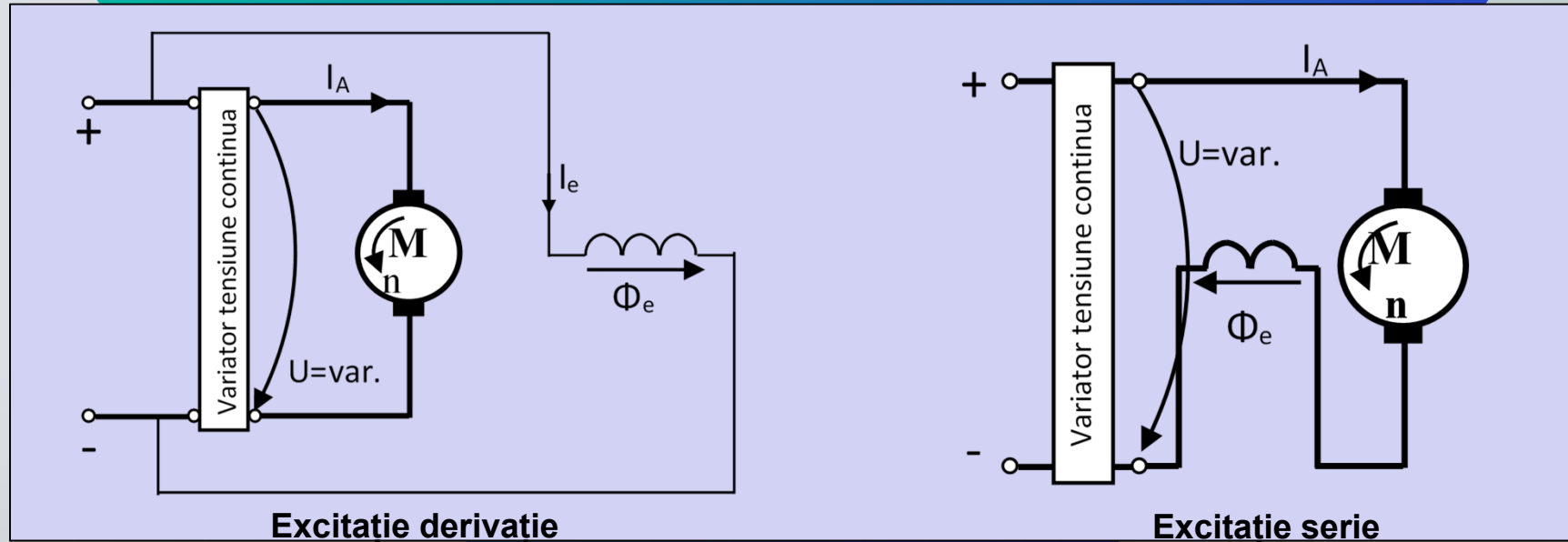
Modalitățile de variație a turației la motorul de c.c. sunt date de:

I. Variația tensiunii de alimentare

II. Variația rezistenței circuitului rotoric

III. Variația fluxului de excitație

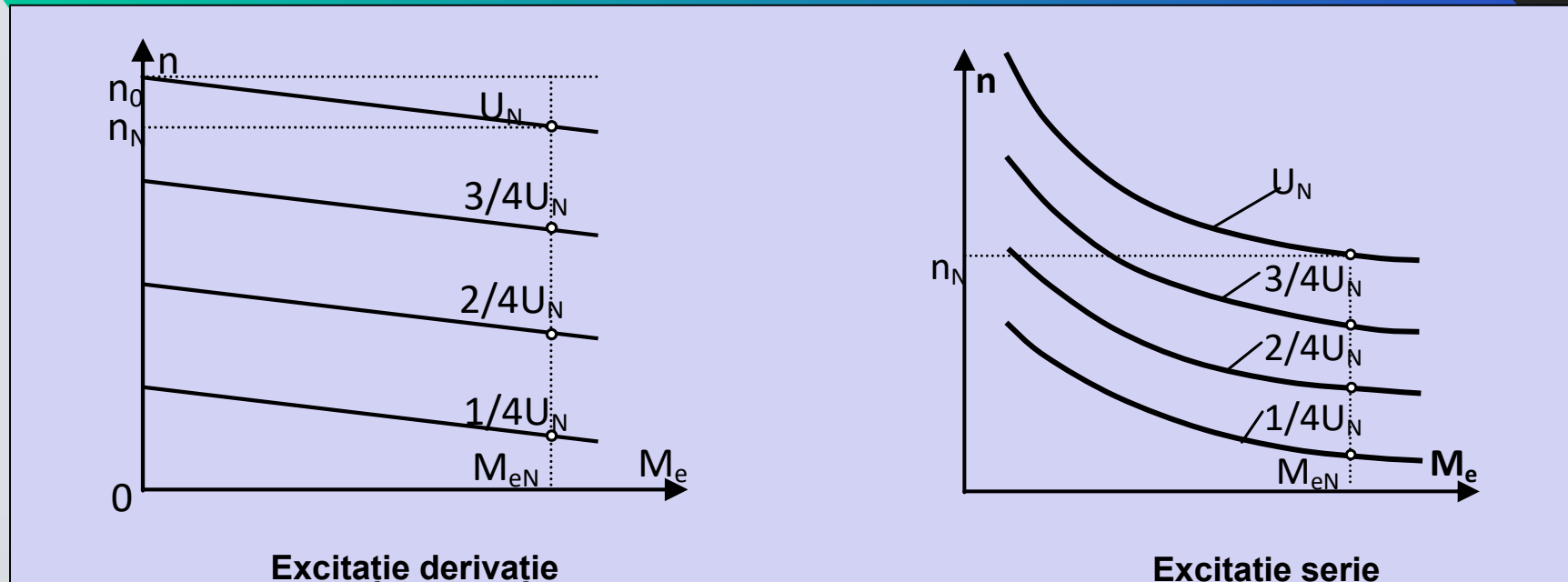
I. Variația tensiunii de alimentare



Ca și în cazul metodei de pornire, este necesar un VTC sau un chopper, ceea ce face ca metoda să necesite aparatură suplimentară scumpă.

În cazul motorului cu excitație derivație, trebuie avut grijă ca tensiunea variabilă să fie aplicată numai pe înfășurarea indusului.

La motorul cu excitație serie, variația tensiunii de alimentare implică și modificarea fluxului de excitație.



Expresia turației se poate descompune in doi termeni:

$$n = \frac{U}{k_e \cdot \phi} - \frac{R_A}{k_e \cdot k_m \cdot \phi^2} \cdot M \quad \text{unde s-a folosit relația:} \quad I_A = \frac{M}{k_m \cdot \phi}$$

Caracteristicile obținute pentru valoarea nominală (in acest caz, U_N) se numesc *caracteristici naturale*. Cele obținute pentru valori diferite de cele nominale se numesc *caracteristici artificiale*.

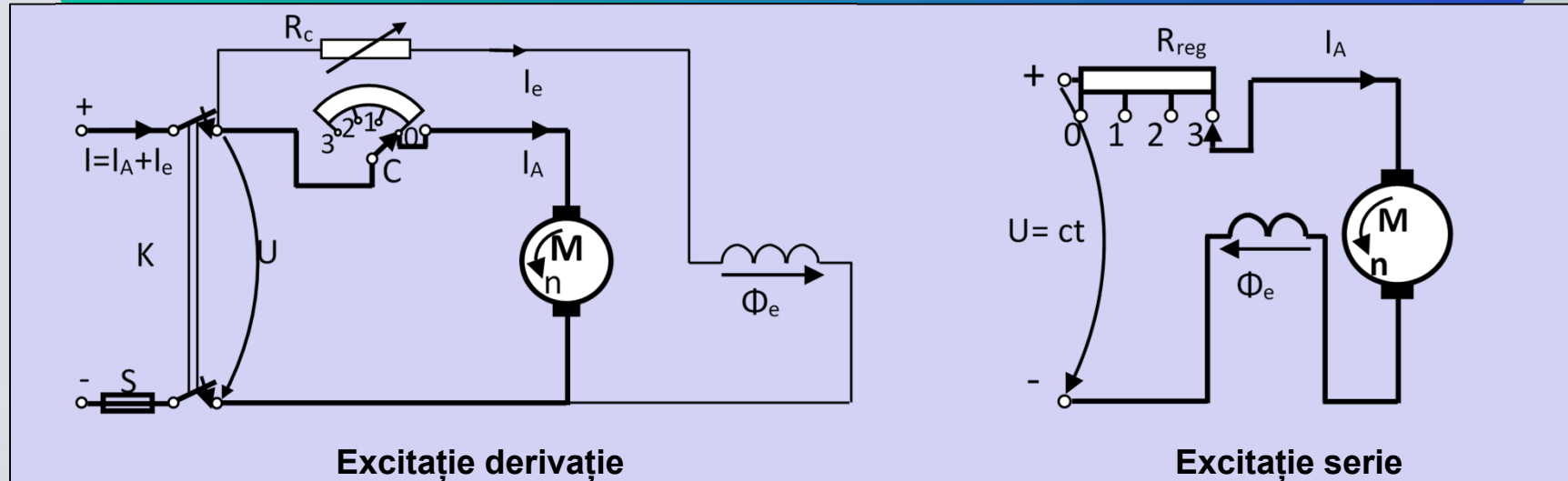
La motorul cu excitație derivație, primul termen se modifică odată cu variația tensiunii, în timp ce al doilea rămâne constant. Drept urmare, caracteristicile au aceeași înclinare (și rămân paralele) modificându-se doar punctul de intersecție cu ordonata (adică valoarea lui n_0).

La motorul cu excitație serie, deși se modifică ambii termeni (atât tensiunea de alimentare cât și curentul de excitație), caracteristicile obținute sunt de asemenea cvasi-paralele.

Concluzii:

- a. **Reglaj eficient, in limite foarte largi, dar NUMAI pentru viteze sub viteza de mers in gol, n_0 (tensiunea de alimentare nu se poate crește, de regulă, peste valoarea nominală);**
- b. **Este necesar aparataj scump (variator de tensiune continuă, chopper);**
- c. **Metoda poate fi folosită și la pornire.**

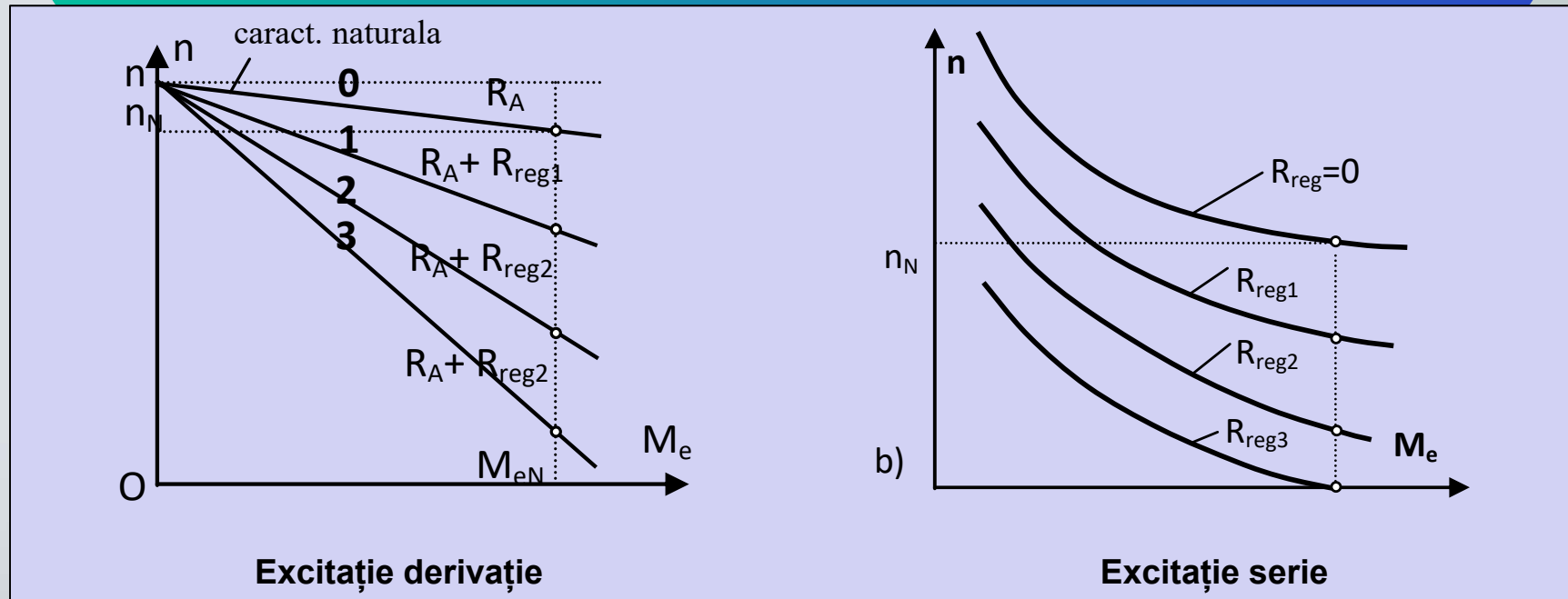
II. Variația rezistenței circuitului rotoric



In cazul acestei metode, variația turației se obține prin modificarea rezistenței circuitului rotoric. In acest scop, se înscriază în circuitul indusului o rezistență variabilă (continuu sau în trepte așa cum este figurat pe desen)

Rezistența trebuie dimensionată în așa fel încât să funcționeze pe termen nelimitat, fără să se încălzească excesiv. Această rezistență poate fi folosită și la pornire.

Bornele înfășurării de excitație trebuie conectate direct la sursa de alimentare (rezistența din circuitul indusului NU trebuie să influențeze curentul de excitație).



Expresia turației se poate scrie sub forma:

$$n = n_0 - \frac{R_A}{k_e \cdot k_m \cdot \phi^2} \cdot M$$

La motorul cu excitație derivație, primul termen rămâne constant, în timp ce al doilea crește odată cu creșterea rezistenței. Drept urmare, caracteristicile mecanice pornesc din același punct ce corespunde turației de mers în gol, n_0 , dar au înclinare diferită (ce crește odată cu valoarea rezistenței de reglare, R_{reg}).

La motorul cu excitație serie se modifică ambii termeni (atât rezistența circuitului indusului cât și curentul de excitație), iar caracteristicile obținute au o înclinare diferită.

Concluzii:

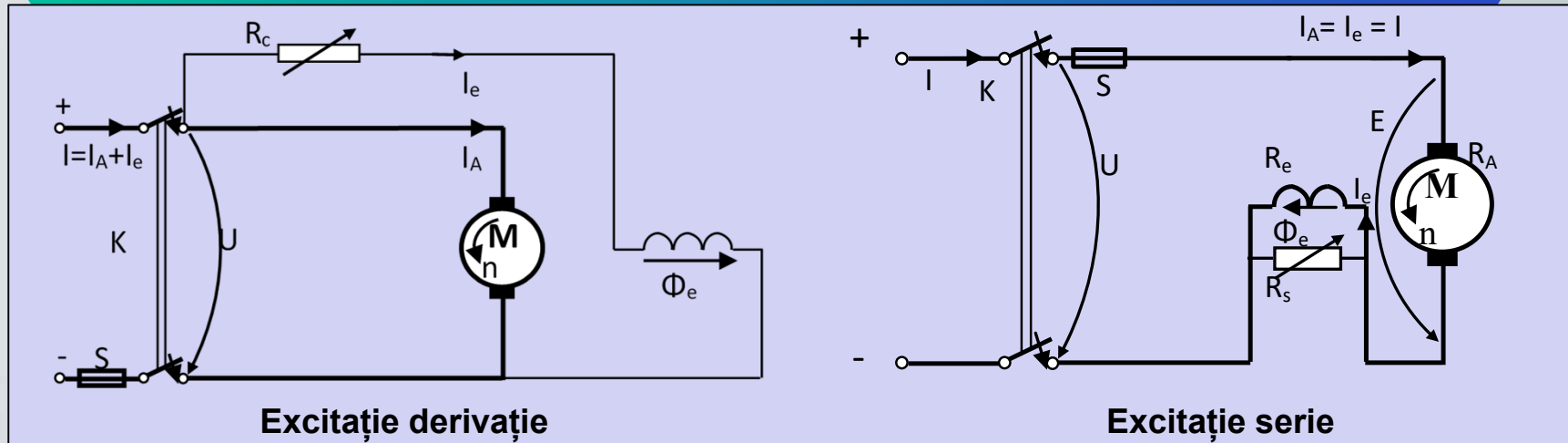
- a. Reglaj eficient, in limite foarte largi, dar NUMAI pentru viteze sub viteza de mers in gol, n_0 (deoarece rezistența circuitului rotoric nu poate fi decât crescută);
- b. Aparatajul utilizat este ieftin (rezistență variabilă);
- c. Variația vitezei este însoțită de pierderi de energie importante (prin efect Joule pe rezistență);
- d. In cazul motoarelor serie utilizate in tracțiune, metoda este folosită frecvent și pentru oprirea vehiculului.



Reostatul de pornire NU poate fi utilizat pentru reglarea vitezei dar reostatul de reglare a vitezei poate fi utilizat pentru pornire

III. Variația fluxului de excitație

$$n = \frac{U_A - R_A \cdot I_A}{k_e \cdot \phi}$$



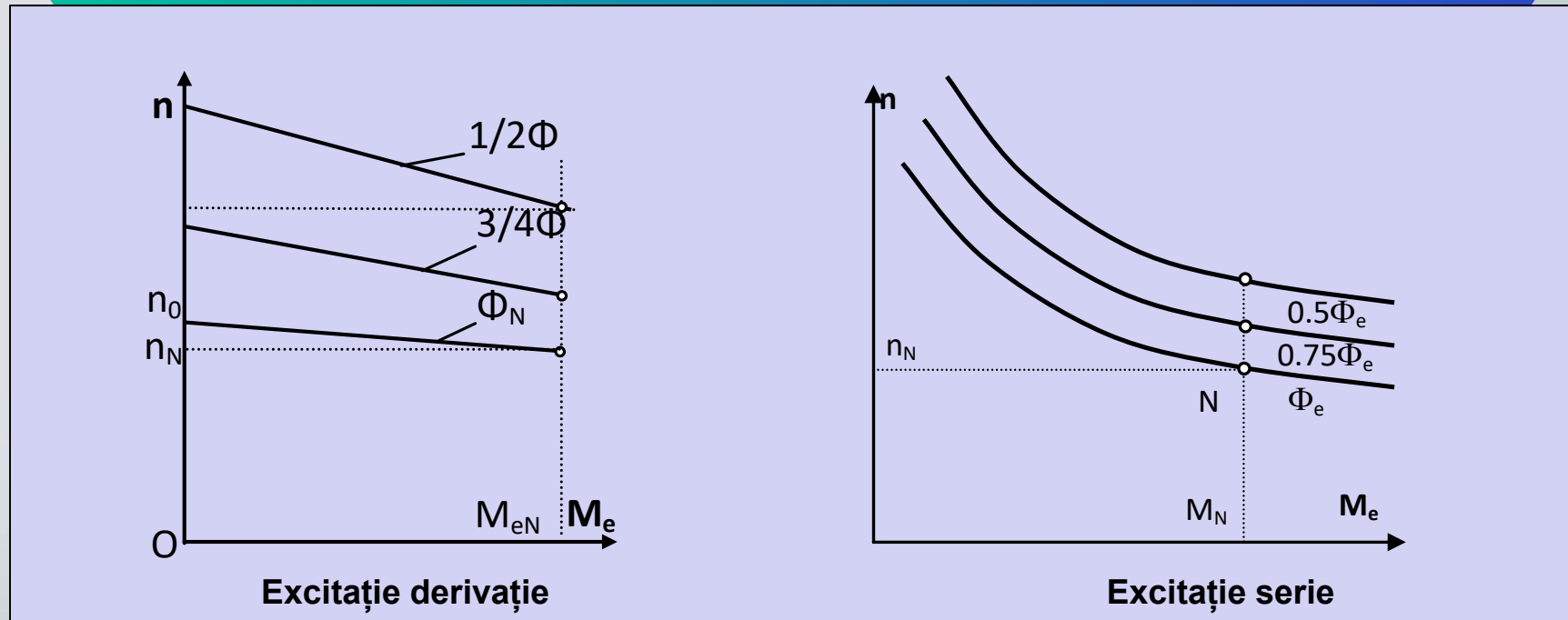
Metoda constă în modificarea curentului de excitație și drept urmare, a fluxului de excitație.

Modul cel mai simplu este înserierea unei rezistențe variabile în circuitul de excitație (la motorul cu excitație derivație).

La motorul cu excitație serie, rezistența se conectează în paralel pe înfășurarea de excitație.

Din expresia turației se observă că fluxul se află la numitorul expresiei. La motorul derivație, prin scăderea fluxului (adică scăderea curentului de excitație prin *mărirea* valorii rezistenței R_c) se pot obține viteze mai mari decât viteza de mers în gol.

La motorul serie, scăderea fluxului se obține prin *micșorarea* valorii rezistenței R_s obținându-se astfel viteze mai mari.



Caracteristicile mecanice pun in evidență faptul că, odată cu scăderea fluxului inductor (practic, introducerea unei rezistențe nu poate decât să scadă fluxul inductor) se obțin caracteristici artificiale situate deasupra caracteristicii naturale, adică viteze mai mari.

Concluzii:

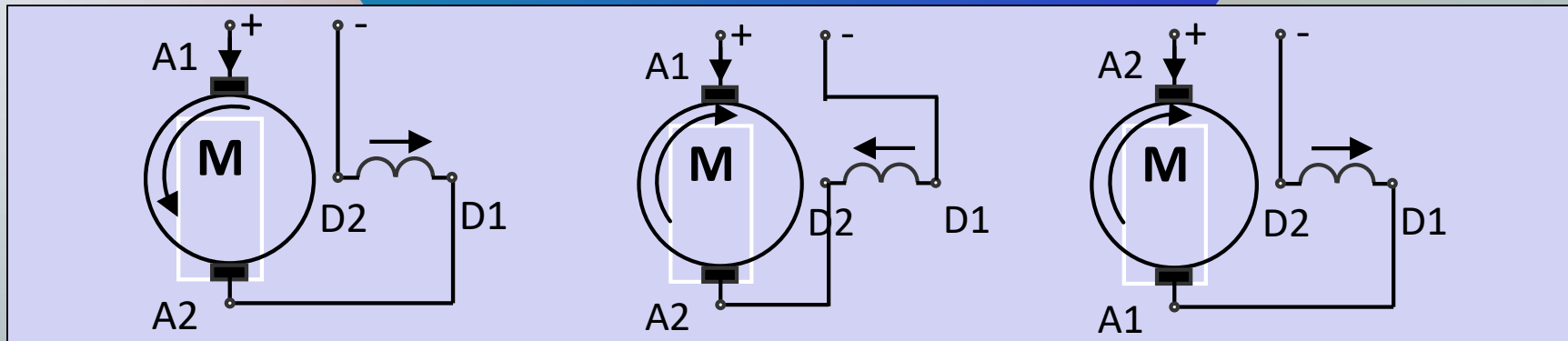
- a. Este singura metodă ce permite și reglajul vitezei peste valoarea de mers în gol.
- b. Aparatajul utilizat este ieftin (doar o rezistență variabilă).
- c. Pierderile de energie prin efect Joule pe rezistența de câmp sunt mult mai mici decât în cazul anterior folosirii rezistenței înseriate în circuitul indusului.
- d. În cazul reglajului vitezei peste n_0 , dacă se menține constant cuplul rezistent, atunci are loc o creștere semnificativă a curentului prin rotor ($M = k_m \cdot \phi \cdot I_A$). Este preferabilă o scădere a cuplului rezistent în această situație.
- e. O scădere accentuată a fluxului inductor (defluxare) poate duce la o funcționare instabilă a motorului.

Inversarea sensului de rotație

$$M_e = k_m \cdot I_A \cdot \phi$$

a. Inversarea sensului curentului I_A \longrightarrow Inversare capetelor înfășurării rotorice (A_1 cu A_2)

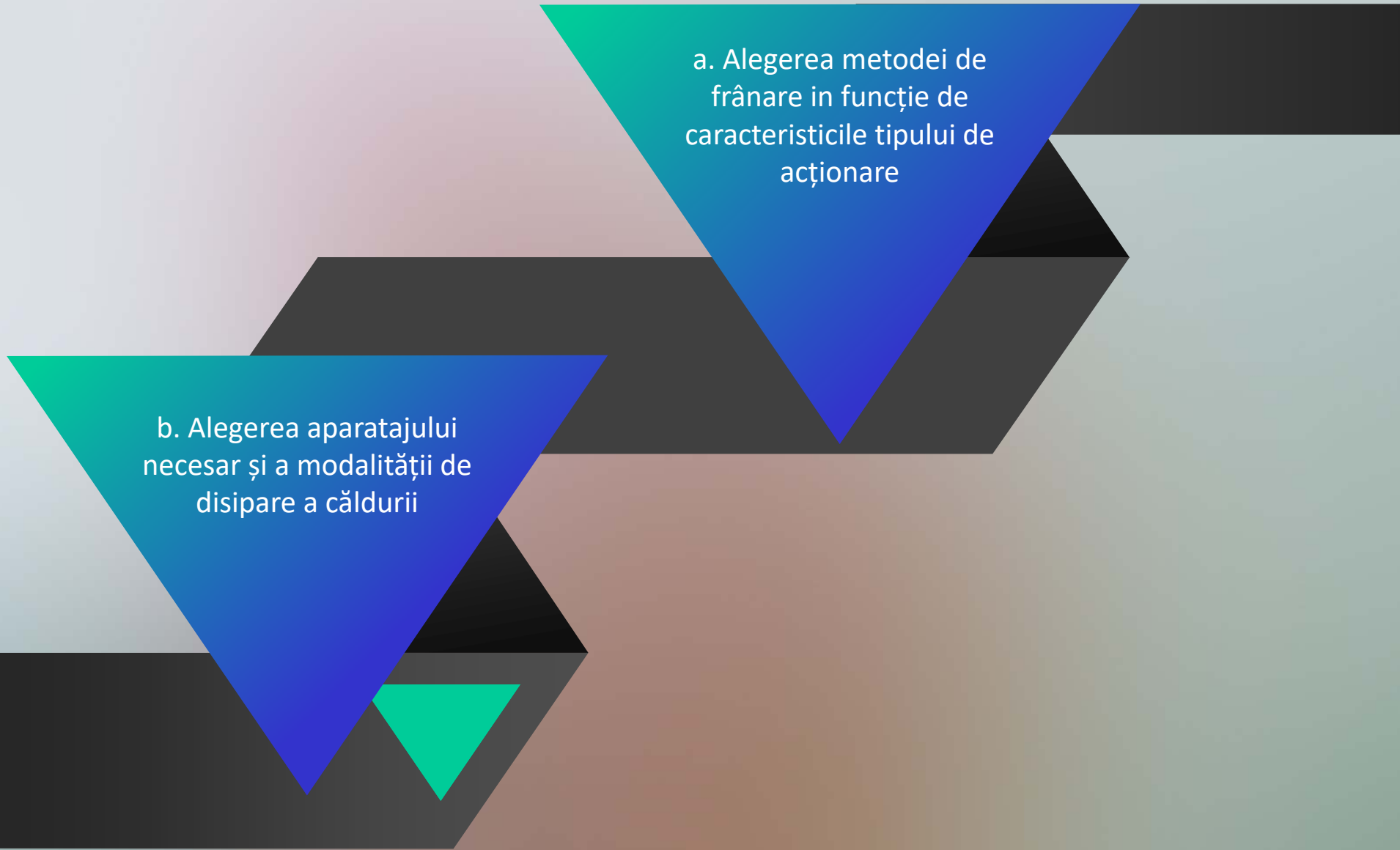
b. Inversarea sensului fluxului inductor ϕ \longrightarrow Inversarea sensului curentului de excitație I_e \longrightarrow Inversarea bornelor înfășurării de excitație (D_1 cu D_2 de exemplu)



NICIODATĂ inversarea sensului de rotație nu se obține inversând “ + ” cu “ - ” la sursa de alimentare.

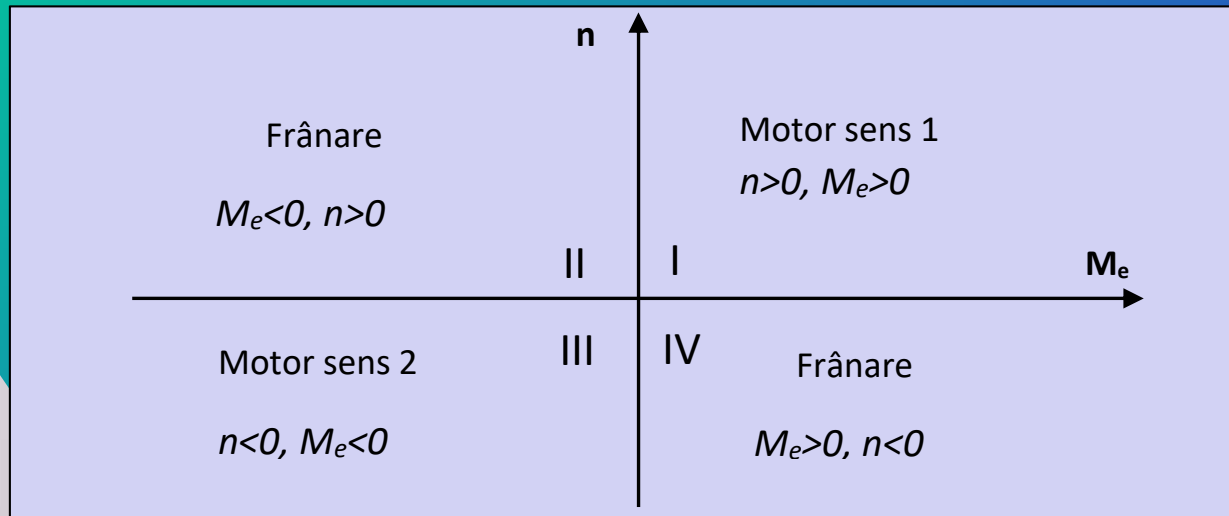
II. Caracteristici de frânare

Frânarea motorului de c.c. are în vedere următoarele aspecte:



a. Alegerea metodei de frânare în funcție de caracteristicile tipului de acționare

b. Alegerea aparatului necesar și a modalității de disipare a căldurii



Funcționarea în regim de frânare a mașinii de c.c. presupune că mașina se rotește în sens invers sensului cuplului electromagnetic dezvoltat.

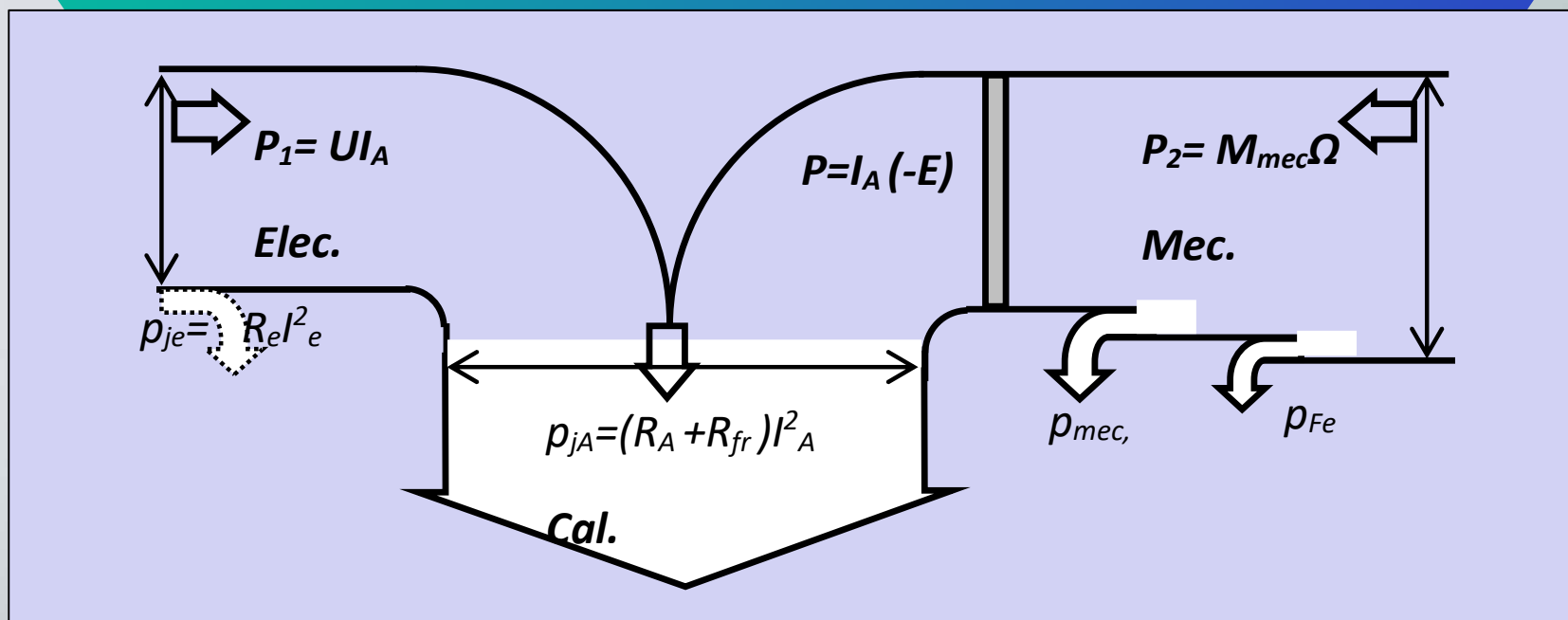
Regimurile de funcționare pot fi reprezentate pe caracteristica mecanică $n=f(M_e)$. În cadranele I și III, turația și cuplul electromagnetic au același sens. Mașina de c.c. funcționează în regim de motor având sens „direct” sau sens „invers”.

Cuplul electromagnetic se opune (frânează) rotirii rotorului în cadranele II și IV.

După cum se va vedea, în cadranul II mașina de c.c. funcționează în regim de generator (cuplul electromagnetic se opune rotirii rotorului acționat de o mașină sau agent de antrenare).

În cadranul IV, mașina de c.c. funcționează în regim de frână propriu-zisă. Trebuie specificat faptul că funcționarea în regim de frână nu reprezintă o modalitate de funcționare „in sine” ci un regim tranzitoriu între două stări stabile de funcționare.

Bilanțul puterilor mașinii de c.c. în regim de frână



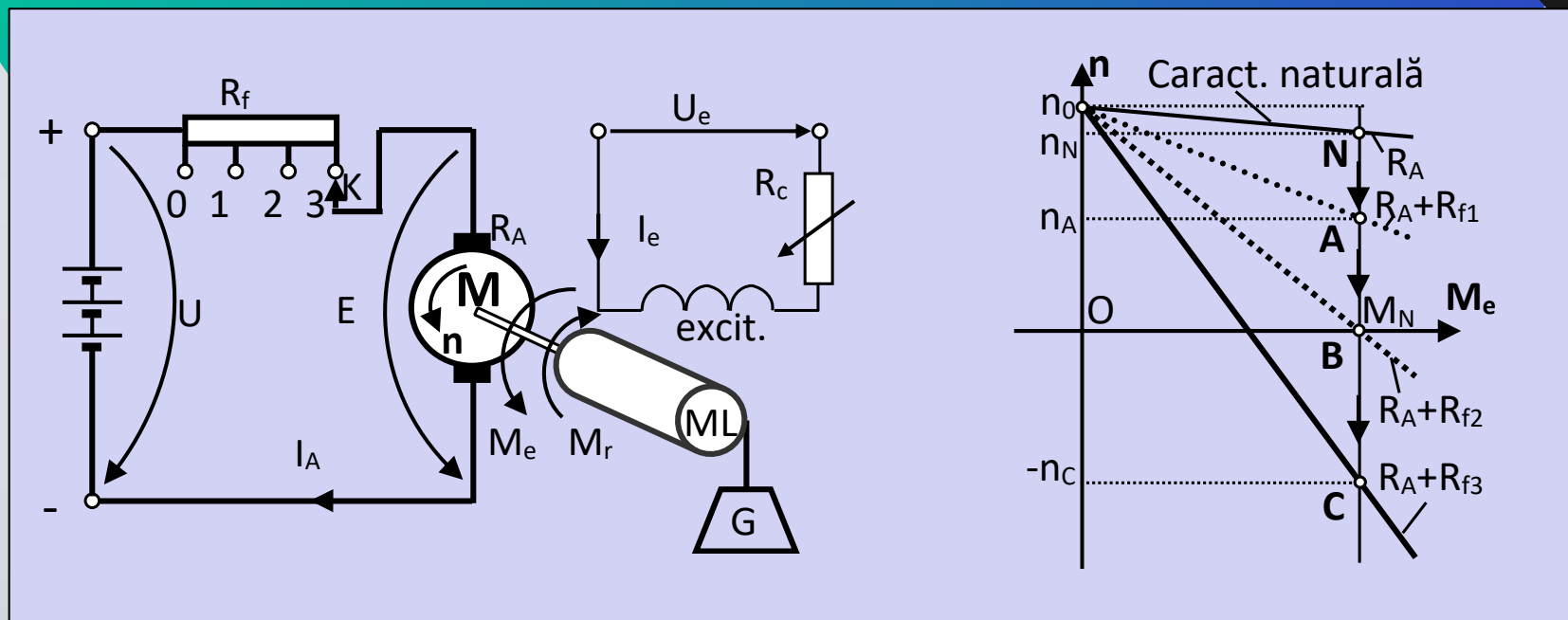
În regim de frânare, mașina electrică primește putere electrică pe la borne (P_1) și primește putere mecanică pe la ax (P_2).

Întreaga sumă de puteri este transformată în căldură (prin pierderi de tip Joule), majoritar în înfășurarea rotorică.

Întrucât curentul prin înfășurarea rotorică are, de regulă, valori peste cea nominală, este necesară introducerea unei rezistențe suplimentare de frânare.

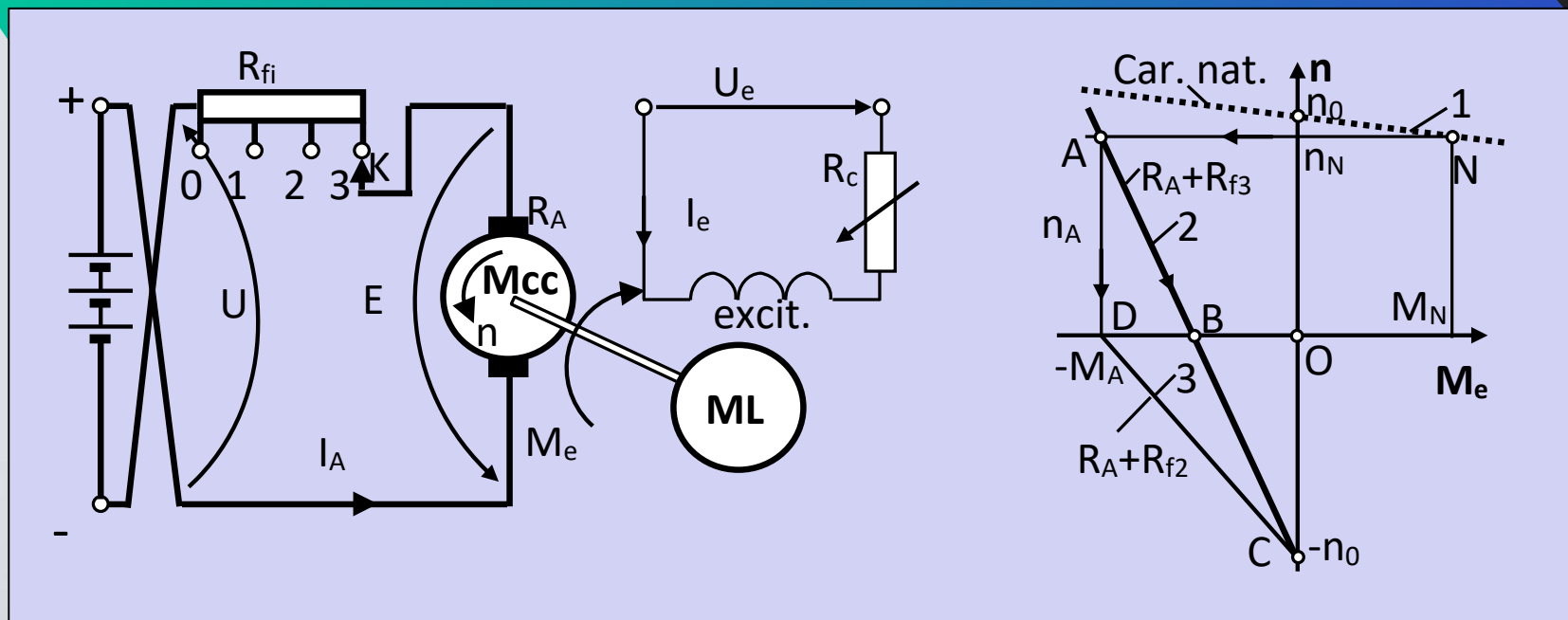
a. Regimul de frână propriu-zis

$$n = \frac{U_A - R_A \cdot I_A}{k_e \cdot \phi}$$



1. Motorul ridică o sarcină (punct de funcționare pe caracteristica naturală, N).
2. În apropierea capătului de cursă se introduce R_{f1} pentru încetinirea mișcării (inițial, comutatorul K se află pe poziția 0 a rezistenței de frânare). Punctul de funcționare trece pe caracteristica artificială în A (regim de reglare a vitezei prin introducerea unei rezistențe în circuitul indusului).
3. Dacă se mărește rezistența de frânare (R_{f2}) motorul trece pe următoarea caracteristică și se oprește în punctul B.
4. Mărind rezistența de frânare și mai mult (K pe poziția 3, R_{f3}) se inversează sensul de rotație și sarcina coboară. Se declanșează un regim de frână întrucât mașina primește energie electrică pe la borne și energie mecanică (din câmpul gravitațional) pe la arbore. Punctul de funcționare este în cadranul IV. Sistemul funcționează cu turație controlată, n_c , și nu duce la oprirea sistemului. Pentru oprire, se revine la rezistența R_{f2} (plotul 2).

b. Frânarea contracurent

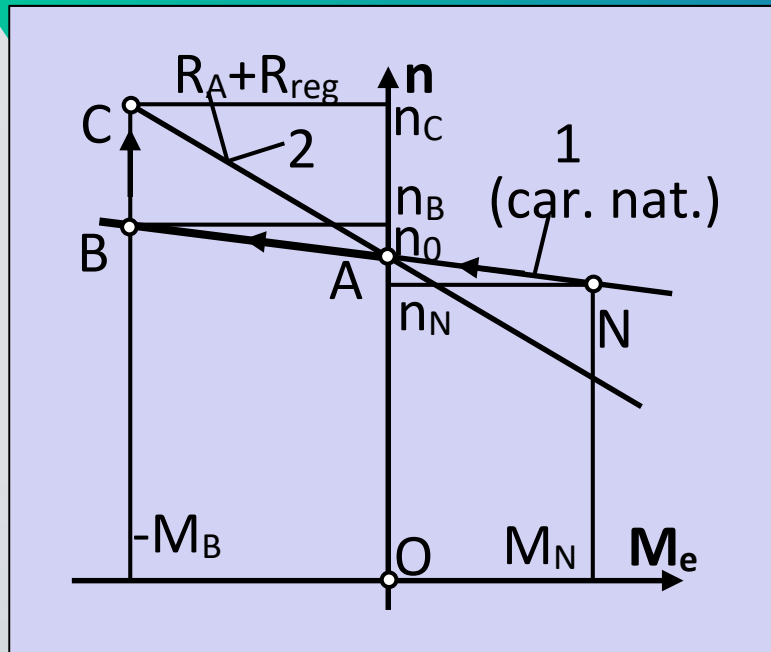


1. Se folosește pentru frânare bruscă.
2. Se inversează polaritatea tensiunii de alimentare și se introduce OBLIGATORIU o rezistență de frânare, R_{fi} .
3. Punctul de funcționare sare din N în A și funcționarea are loc pe dreapta AB . Inclinarea acestei drepte de funcționare depinde de valoarea rezistenței R_{fi} .
4. În punctul B mașina se oprește. Dacă nu se decuplează de la sursa de alimentare, ea începe să se rotească în sens invers (funcționează pe dreapta BC).
5. Rezistența preia energia de frânare sub formă de căldură (pierderi Joule).



La mașinile cu excitație serie, derivație și mixtă se inversează bornele indusului.

c. Frânarea cu recuperare în regim de generator

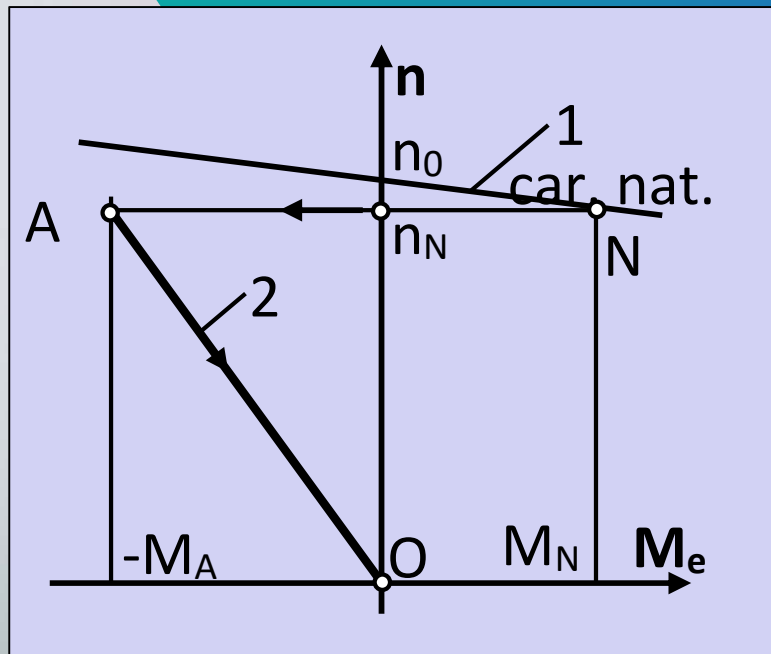


1. Nu duce la oprirea motorului ci DOAR la limitarea vitezei.
2. Energia generată poate fi recuperată către rețeaua de alimentare a motorului.

Ex: Tren acționat de motor de c.c. care la un moment dat începe să coboare o pantă

- Componenta gravitațională accelerează trenul ducându-l din punctul N la o viteză mai mare decât n_0 . Punctul de funcționare trece de A către B.
- Mașina electrică funcționează în regim de generator iar cuplul electromagnetic frânează mișcarea rotorului.
- Mașina poate furniza energie electrică rețelei la care este conectată.
- Se poate crește viteza de coborâre a trenului (din B în C) dacă se introduce în circuitul indusului o rezistență de reglare, R_{reg} . Punctul de funcționare trece de pe caracteristica 1 pe caracteristica 2.

d. Frânarea fără recuperare în regim de generator



1. Se deconectează motorul de la sursa de alimentare și se conectează pe o rezistență.
2. Punctul de funcționare sare din N în A.
3. Mașina funcționează în regim de generator (acționat de forța de inerție).
4. Mașina se rotește până la oprire, punctul O.
5. Întreaga energie de frânare se disipă pe rezistența de frânare sub formă de pierderi Joule (căldură).

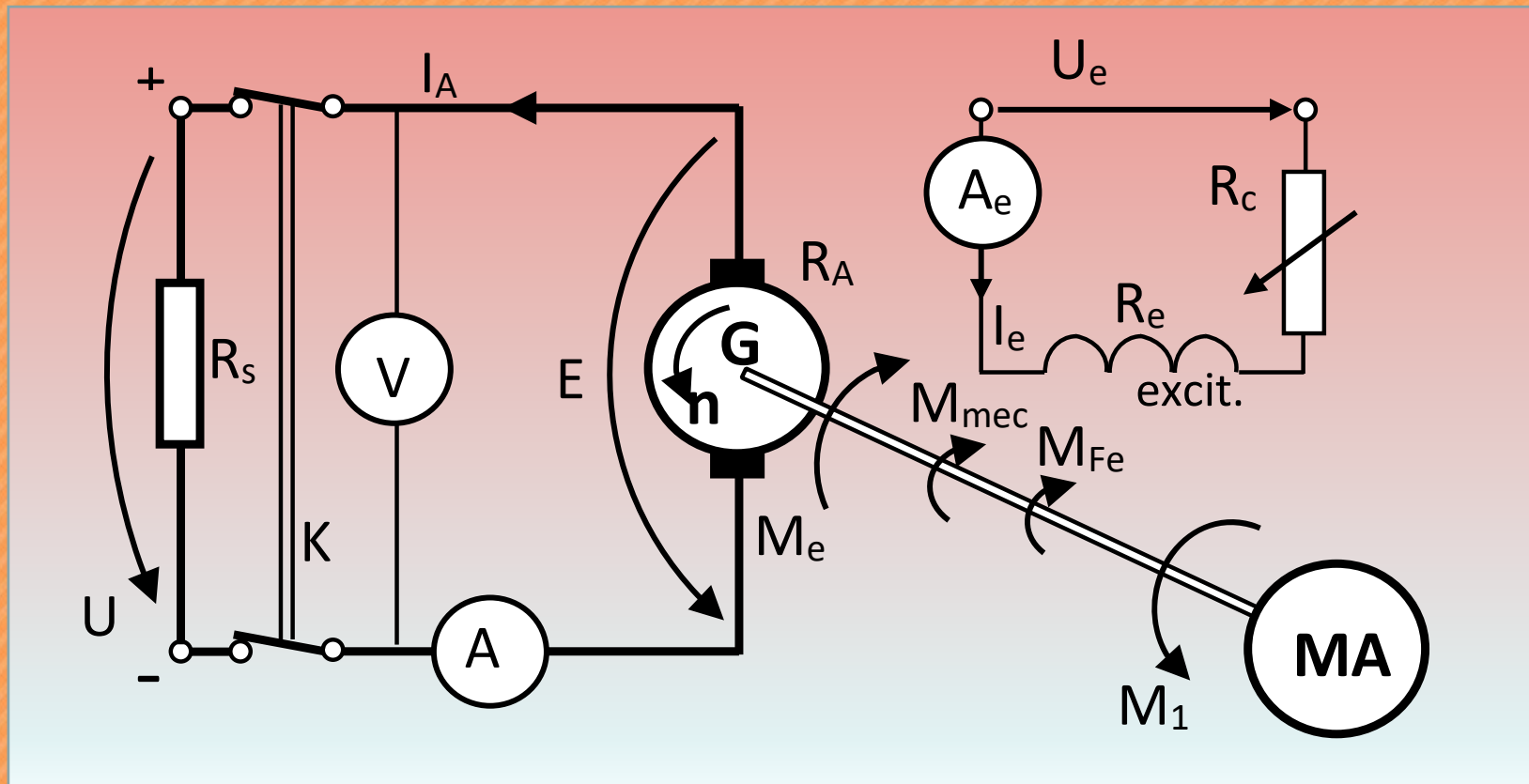


Deconectarea motorului se face numai pe înfășurarea indusului. Înfășurarea de excitație TREBUIE să rămână în continuare alimentată pentru a produce câmpul inductor.

CURS 7

Studiul generatoarelor de C.C.





Funcționarea mașinii de c.c. în regim de generator presupune că mașina primește energie mecanică furnizată de o mașină de antrenare, MA, pe care o convertește în energie electrică disponibilă la borne.

Sarcina mașinii este reprezentată de rezistența de sarcină, R_s .

La arborele (axul) mașinii electrice acționează o serie de cupluri, după cum urmează:

- Cuplul motor M_1 (de antrenare) furnizat de mașina de antrenare;
- Cuplul electromagnetic M_e dezvoltat de mașina de c.c. Acesta se opune rotirii rotorului și are, prin urmare, un caracter rezistent;
- Cuplurile datorate pierderilor mecanice, M_{mec} și pierderilor în fierul rotorului M_{fe} . Și acestea au un caracter opozant cuplului de antrenare.

Ecuția de echilibru mecanic în regim dinamic este:

$$M_1 - M_{mec} - M_{Fe} - M_e = J \cdot \frac{d\Omega}{dt}$$

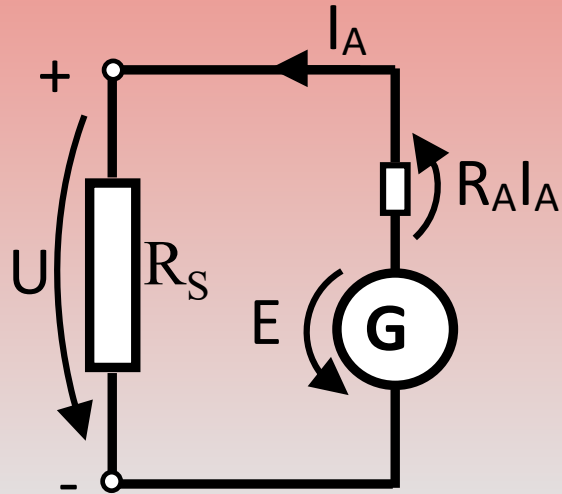
unde:

$$M_e = -\frac{p}{a} \cdot \frac{N}{2\pi} \cdot I_A \cdot \phi = -k_m \cdot \phi \cdot I_A$$

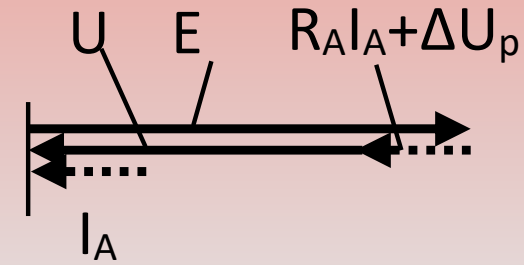
iar: $J \cdot \frac{d\Omega}{dt}$ reprezintă momentul de inerție al sistemului (m.c.c. + ML)

În regim stabilizat ($\Omega = ct$; adică la viteză constantă), ecuația de echilibru a cuplurilor devine:

$$M_1 = M_m + M_{Fe} + M_e$$



a. schema circuitului electric



b. diagrama fazorială

Schema electrică a generatorului de c.c. pune în evidență următoarele elemente: tensiunea la borne, U ; curentul prin înfășurarea indusului, I_A ; tensiunea indusă în înfășurarea rotorică de către câmpul inductor conform legii inducției electromagnetice, E ; căderea de tensiune pe înfășurarea indusului, $R_A \cdot I_A$; căderea de tensiune la perii, ΔU_p .

$$E = \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{60} \cdot n \cdot \phi = k_e \cdot n \cdot \phi$$

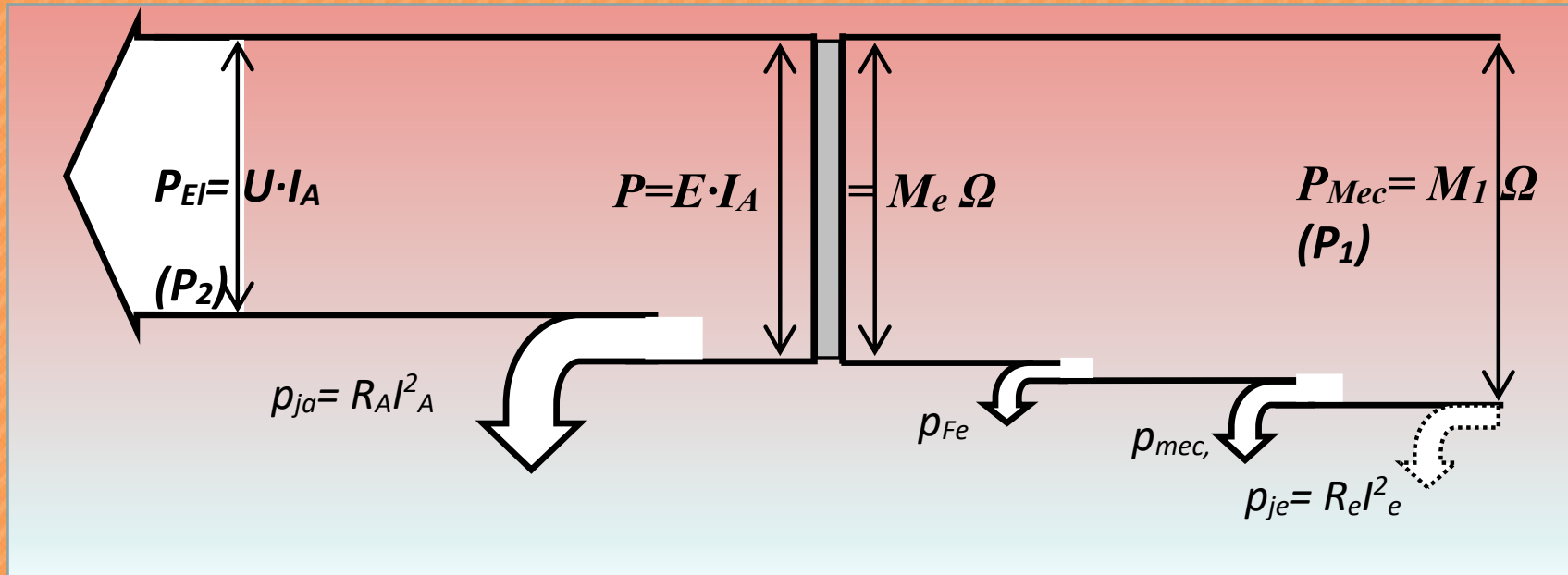
- Expresia tensiunii induse

$$E = U_A + R_A \cdot I_A + \Delta U_p$$

- Ecuația de echilibru al tensiunilor

DIAGRAMA DE BILANȚ ENERGETIC

Aceasta diagrama exprima echilibrul puterilor in mașina de c.c. in regim de generator.



- P_1 – puterea absorbită (putere mecanică la arbore);
- P – puterea electromagnetică
- P_2 – puterea cedată (putere electrică)

- p_{je} – pierderi in înfășurarea de excitație
- p_{ja} – pierderi in înfășurarea rotorică
- p_{mec} – pierderi mecanice si de ventilație
- p_{Fe} – pierderi in fier (in miezul rotoric)

Randamentul generatorului de c.c. are expresia:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum p}{P_1}$$

unde: $\sum p = p_{je} + p_{ja} + p_{mec} + p_{Fe}$ reprezintă suma pierderilor

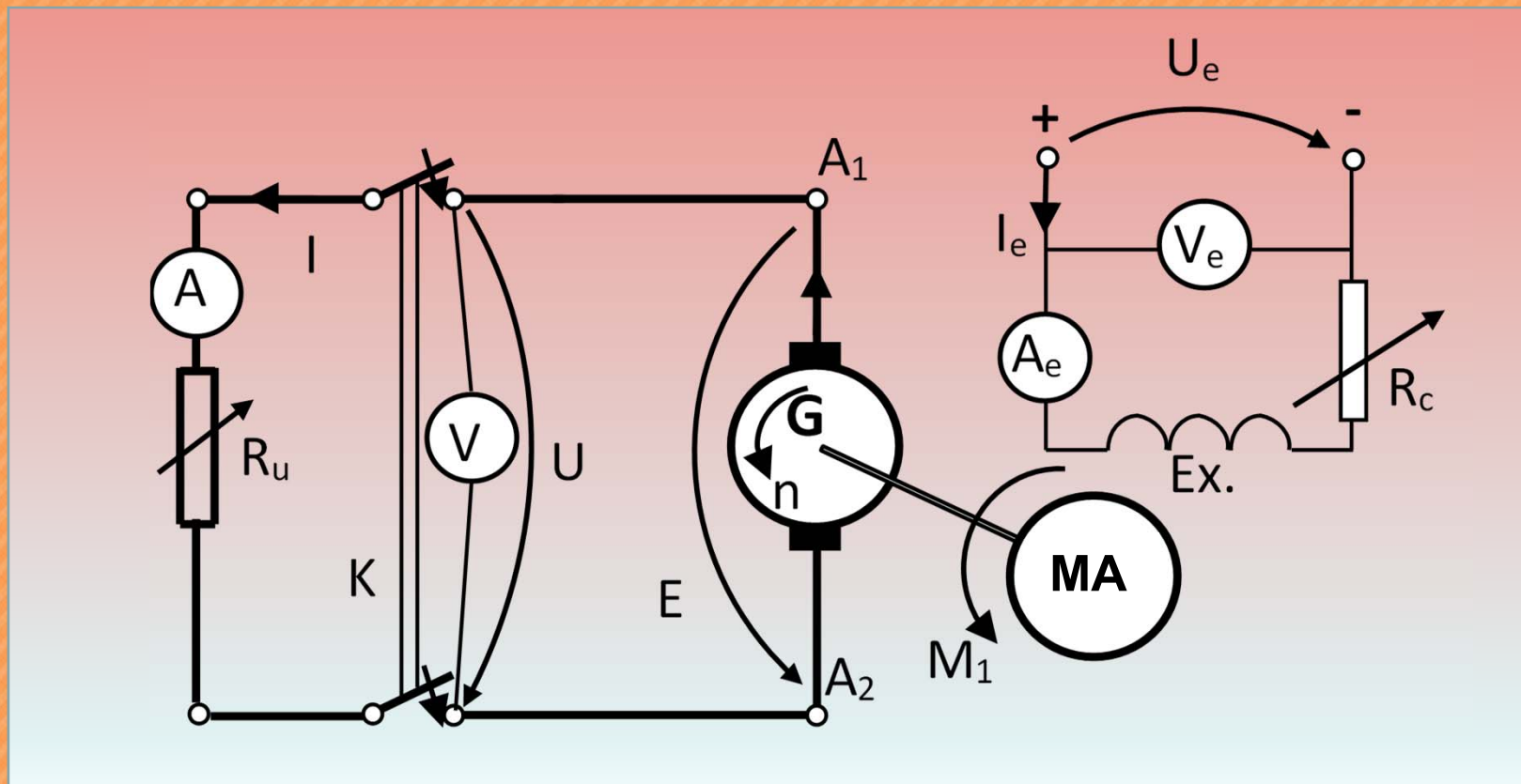
Caracteristicile de funcționare a generatoarelor

Aceste caracteristici exprimă dependența dintre două *mărimi caracteristice* în condițiile în care celelalte se mențin constante.

Mărimi caracteristice: Tensiunea indusă la gol - E_0 ; Tensiunea la borne - U_A ; Curentul prin indus - I_A ; Curentul de excitație - I_e ;

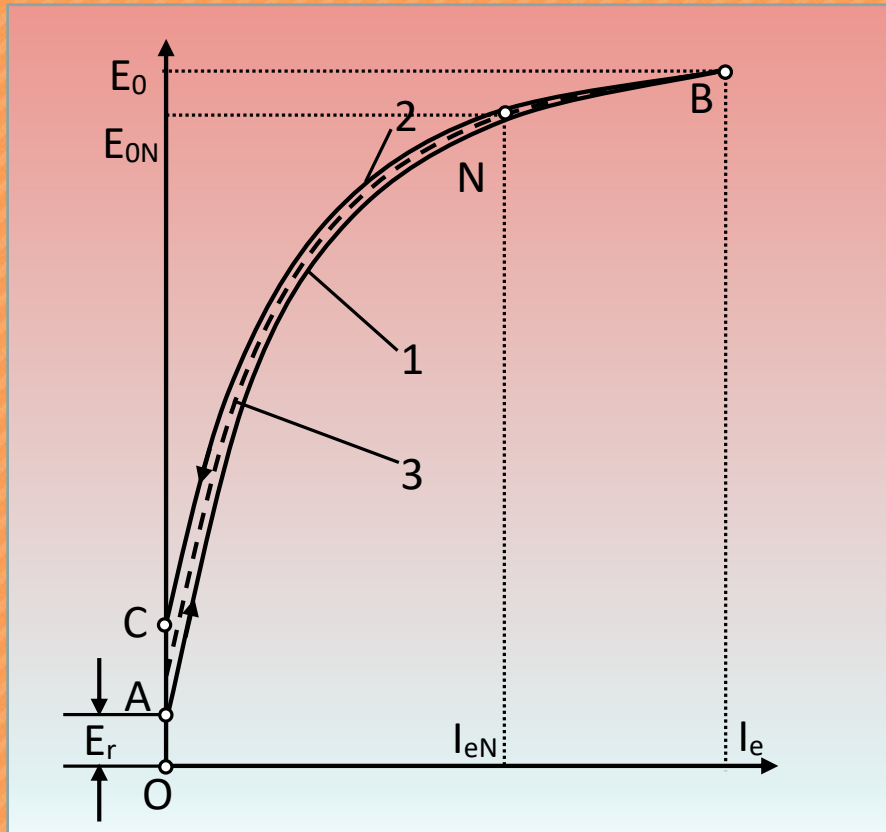
1. Caracteristica de mers în gol: $E_0 = f(I_e)$ pt. $n = \text{ct.}$, $I_A = 0$
2. Caracteristica internă (de sarcină): $U_A = f(I_e)$ pt. $n = \text{ct.}$, $I_A = \text{ct.}$
3. Caracteristica externă: $U_A = f(I_A)$ pt. $n = \text{ct.}$, $I_e = \text{ct.}$
4. Caracteristica de reglaj: $I_e = f(I_A)$ pt. $n = \text{ct.}$, $U_A = \text{ct.}$
5. Caracteristica de scurt-circuit: $I_A = f(I_e)$ pt. $n = \text{ct.}$, $U_A = 0$

I. Generatorul cu excitație separată



Obținerea caracteristicilor de funcționare presupune realizarea unui montaj ca cel din figură. Acesta conține ampermetre și voltmetre plasate în circuitul indusului și în circuitul de excitație, o rezistență de sarcină, R_u , o rezistență de câmp R_c pentru modificarea curentului de excitație și mașina de antrenare MA.

Caracteristica de mers in gol



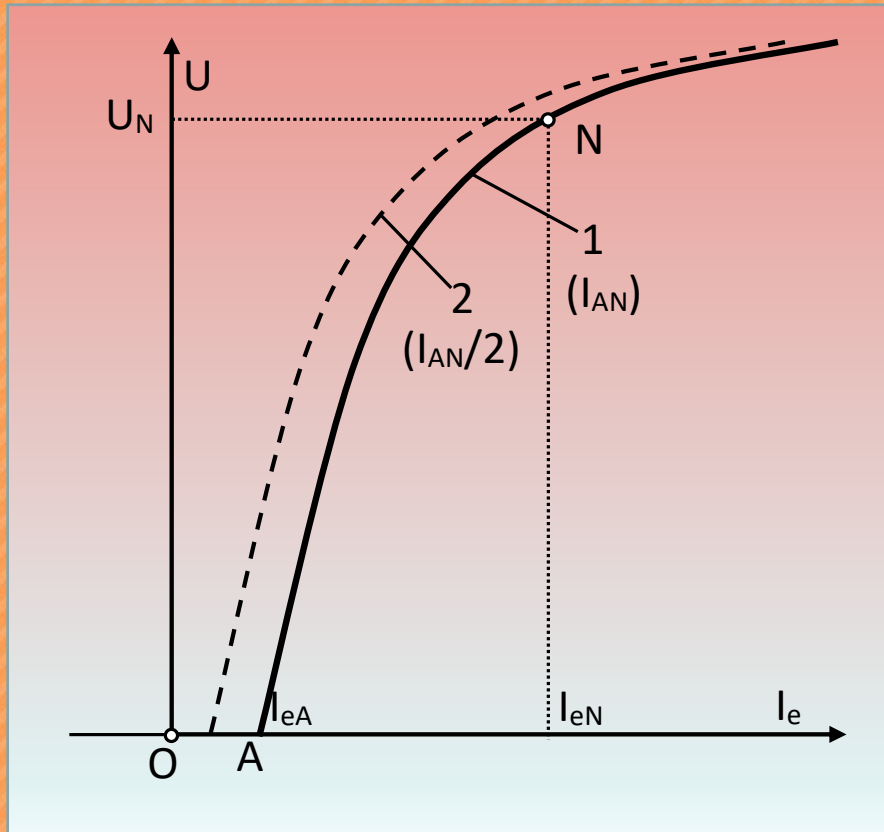
Arată modul de variație a tensiunii induse în funcție de curentul de excitație.

Această caracteristică se obține la funcționarea în gol (întrerupătorul K este deschis) crescând curentul de excitație de la zero până la o valoare ușor mai mare decât valoarea nominală și apoi scăzându-l din nou până la zero.

Caracteristica obținută seamănă cu caracteristica de magnetizare a circuitului magnetic.

Chiar și în lipsa curentului de excitație (a câmpului inductor), la rotirea rotorului apare o tensiune indusă mică, E_r (1-2volți), datorată câmpului remanent.

Caracteristica internă

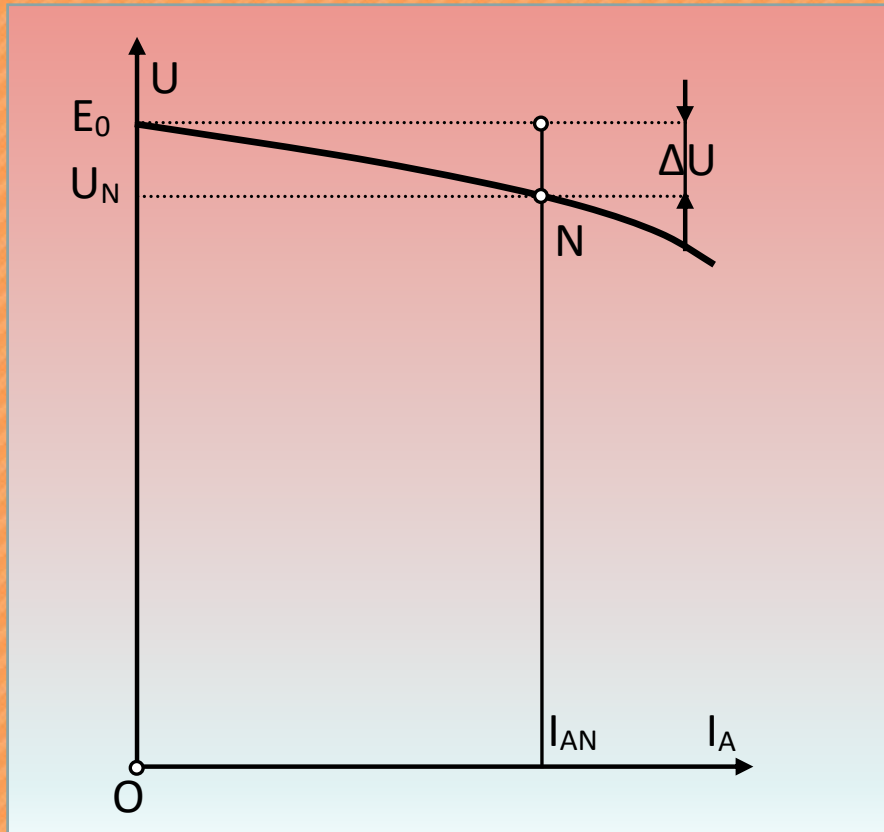


Arată cum poate fi variată tensiunea la bornele generatorului prin curentul de excitație când există o anumită sarcină constantă.

Această caracteristică se obține la funcționarea în sarcină (întrerupătorul K este închis) pornind, de regulă de la punctul de funcționare nominală, N , către valoarea zero (curba 1). Curentul de sarcină trebuie menținut constant la valoarea sa nominală.

Caracteristica internă se poate trasa și pentru o altă valoare a curentului de sarcină (de ex $I_{AN}/2$ – curba 2). Se obține o caracteristică paralelă cu cea nominală dar translată spre stânga.

Caracteristica externă



Arată cum variază tensiunea la bornele generatorului atunci când variază sarcina.

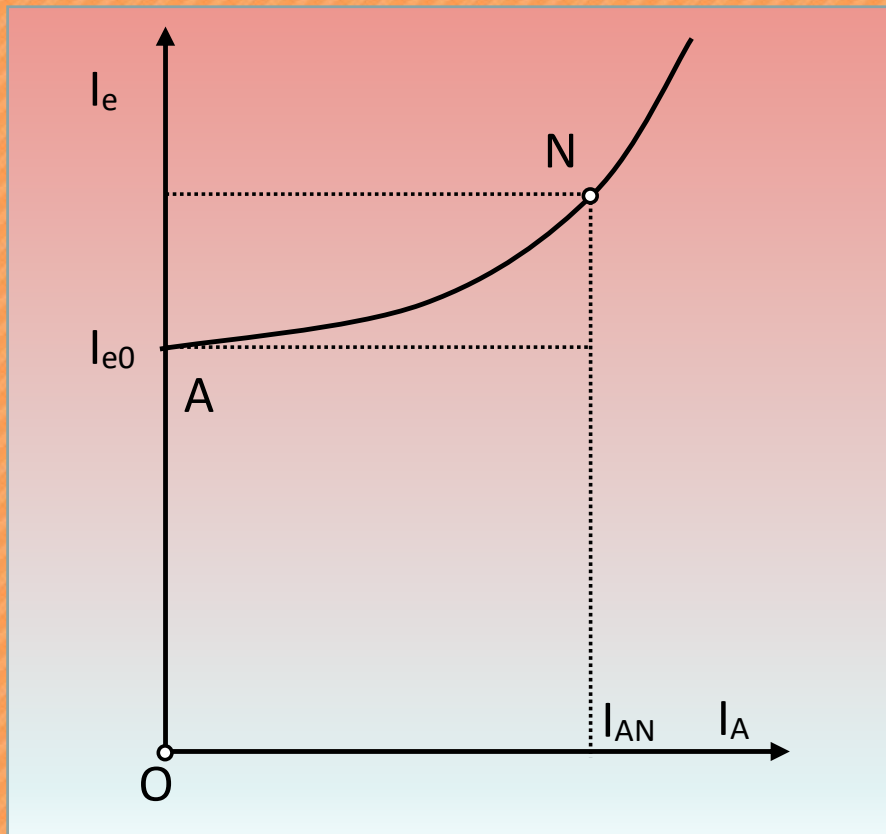
Este cea mai importantă caracteristică a generatorului.

Această caracteristică se obține la funcționarea în sarcină (întrerupătorul K este închis) modificând curentul de sarcină (cu ajutorul rezistenței de sarcină, R_u) de la valoarea nominală la zero.

Odată cu creșterea sarcinii se constată o scădere a tensiunii la bornele mașinii. Această scădere se exprimă prin *variația relativă de tensiune* a cărei expresie este:

$$\Delta u^r = \frac{E_0 - U_N}{U_N} \cdot 100 \in (5 \div 15)\%$$

Caracteristica de reglaj

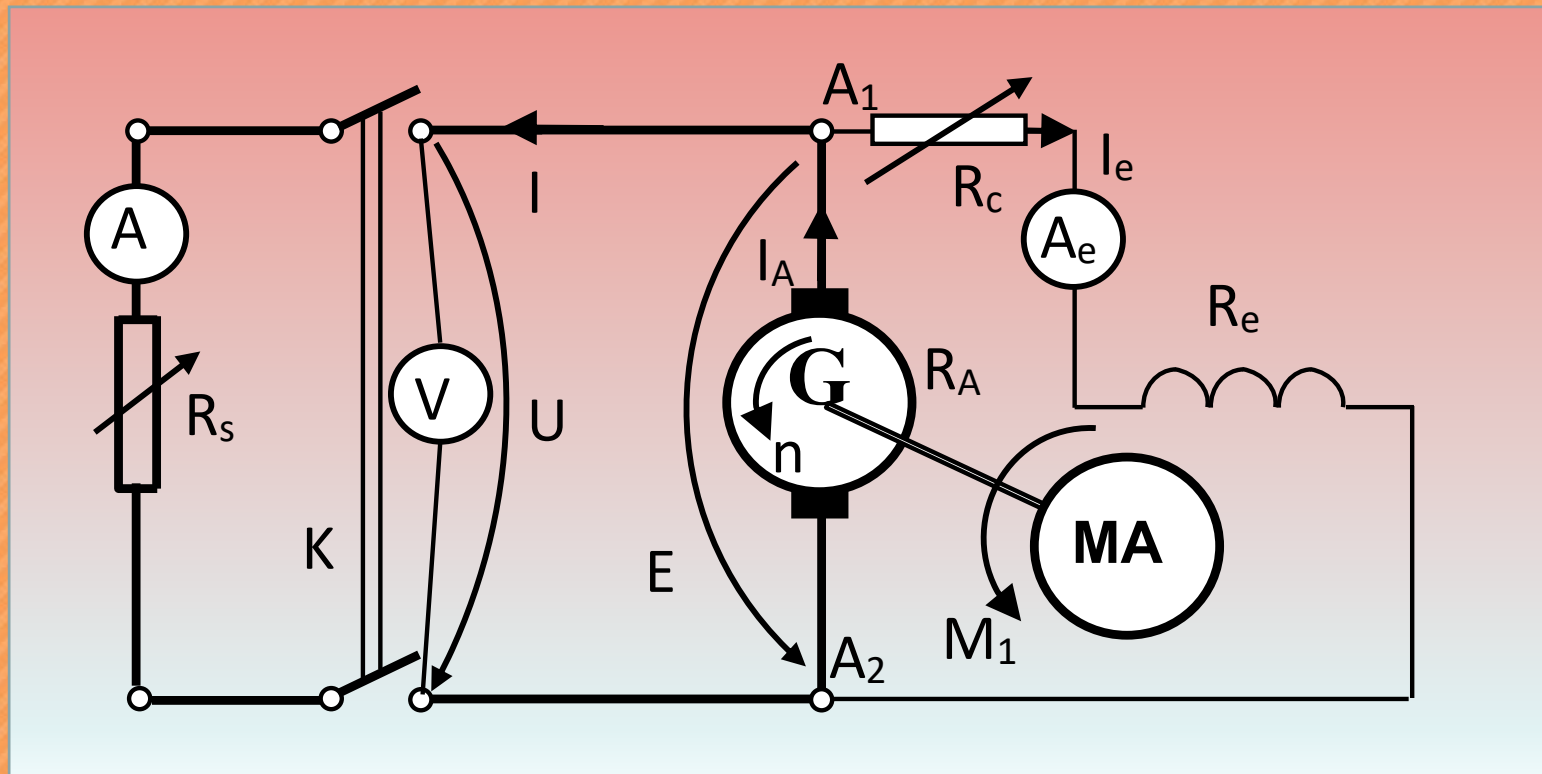


Arată cum TREBUIE variază curentul de excitație pentru a avea la borne o tensiune constantă atunci când variază sarcina.

Această caracteristică se obține la funcționarea în sarcină (întrerupătorul K este închis) modificând curentul de excitație (prin intermediul rezistenței de câmp R_c) astfel încât tensiunea să rămână constantă atunci când variază sarcina (prin rezistența de sarcină, R_u) de la valoarea nominală la zero.

Se constată că, pentru menținerea constantă a tensiunii la borne, odată cu creșterea sarcinii este necesară mărirea fluxului inductor prin intermediul curentului de excitație.

II. Generatorul cu excitație derivație



La mașina cu excitație derivație, circuitul de excitație este conectat în paralel cu înfășurarea indusului. Prin urmare, NU mai există sursa de tensiune pentru crearea câmpului inductor.

Funcționarea mașinii în regim de generator este posibilă NUMAI dacă mașina se poate autoexcita.

Autoexcitarea (sau Amorsarea) reprezintă fenomenul electromagnetic care duce la apariția tensiunii la bornele mașinii, când aceasta se rotește, la o valoare apropiată de cea nominală.

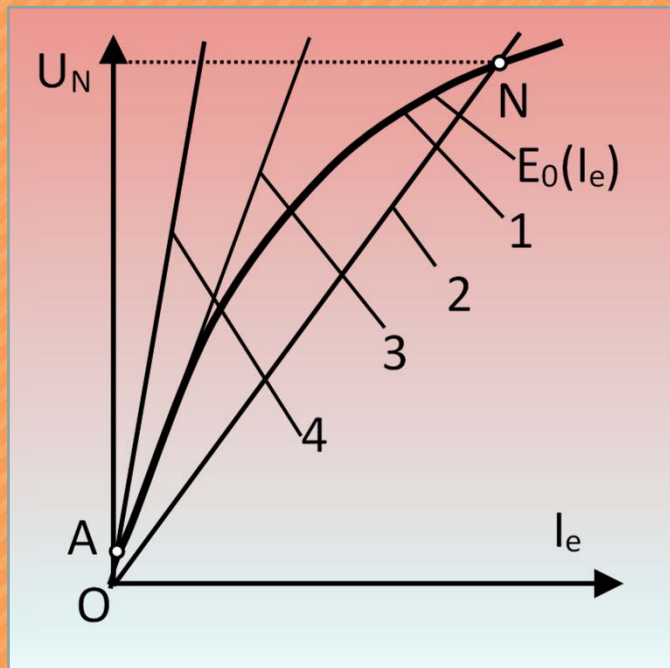
Pentru ca autoexcitarea să fie posibilă trebuie îndeplinite trei condiții:

Condiții de amorsare:

1. Să existe câmp remanent în polii principali ai mașinii. Acest lucru are loc în mod natural la mașinile care au mai funcționat (circuitul magnetic păstrează un câmp remanent). În cazul mașinilor noi sau a celor care nu au mai funcționat o perioadă mai lungă de timp, magnetismul remanent trebuie creat printr-o pornire a mașinii în regim de motor.

2. Fluxul magnetic creat de înfășurarea de excitație să fie în același sens cu fluxul remanent. Întrucât fluxul remanent este similar cu cel creat de un magnet permanent, este posibil ca alimentarea înfășurării de excitație să creeze un câmp de sens contrar celui remanent. Pentru autoexcitare trebuie inversat sensul curentului de excitație.

3. Rezistența circuitului de excitație să fie mai mică decât o așa-numită rezistență critică.



Această problemă se pune atunci când există rezistența de câmp în circuitul înfășurării de excitație.

În figura alăturată sunt reprezentate: curba $E_0=f(I_e)$ – curba 1, adică caracteristica de mers în gol și dreptele caracteristice circuitului de excitație date de relația $E_0=(R_c+R_e)I_e$.

Dacă dreapta 2 intersectează curba 1 (aici în punctul N) atunci mașina se poate amorsa și va funcționa în punctul lor de intersecție.

Dacă dreapta 3 este tangentă la curba 1 avem situația limită de amorsare a mașinii.

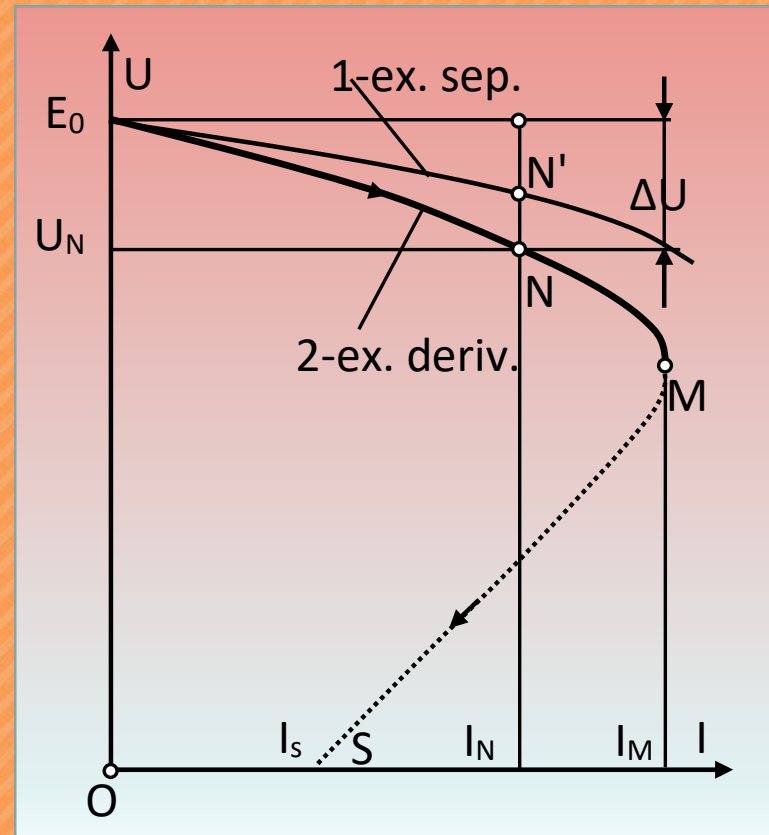
În cazul în care dreapta 4 nu intersectează curba 1 atunci mașina nu se poate amorsa și este necesară diminuarea valorii rezistenței de câmp, poate chiar până la scurtcircuitarea ei.

AMORSAREA

- Câmpul remanent se manifestă similar cu câmpul creat de magneții permanenți însă este extrem de slab. Altfel spus, polii inductori ai mașinii sunt polarizați magnetic.
- Prin rotirea rotorului în acest câmp se induce o tensiune extrem de redusă în înfășurarea rotorului.
- Deoarece înfășurarea de excitație este conectată în paralel cu înfășurarea indusului, tensiunea indusă determină apariția unui curent prin înfășurarea de excitație și deci a unui câmp inductor foarte slab.
- Dacă acest câmp inductor este în același sens cu câmpul remanent, rezultă un câmp mai puternic ce determină o tensiune indusă mai mare.
- Apare deci un curent de excitație mai mare, un câmp inductor mai mare, o tensiune indusă mai mare, ș.a.m.d.
- Fenomenul se stabilizează în apropierea tensiunii nominale ca urmare a saturării circuitului magnetic.

Caracteristica externa

La generatorul cu excitație derivație această caracteristică se trasează menținând $R_c = \text{ct.}$

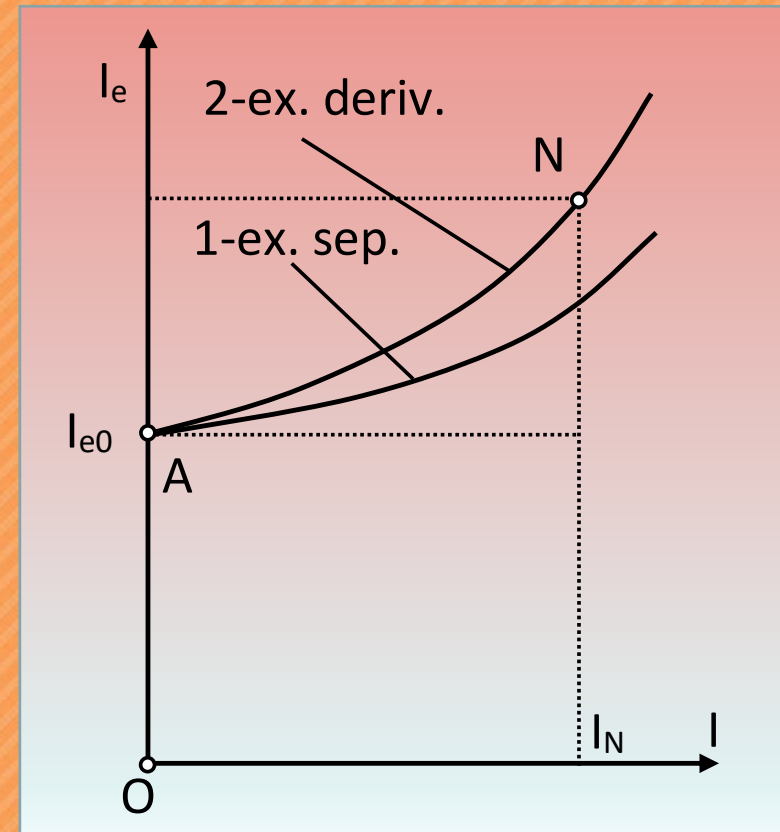


Si in cazul generatorului cu excitație derivație are loc o scădere a tensiunii la borne odată cu creșterea sarcinii. Însă aceasta scădere de tensiune este mai pronunțată decât la generatorul cu excitație separata. Principalul motiv constă in faptul că, odată cu creșterea sarcinii scade tensiunea indusă in înfășurarea rotorică, tensiune ce reprezintă si sursa de alimentare a excitației. Practic, la generatorul cu excitație derivație tensiunea la bornele excitației nu mai rămâne constantă ca in cazul excitației separate.

Variația relativă de tensiune are aceeași expresie însă are valori mai mari:

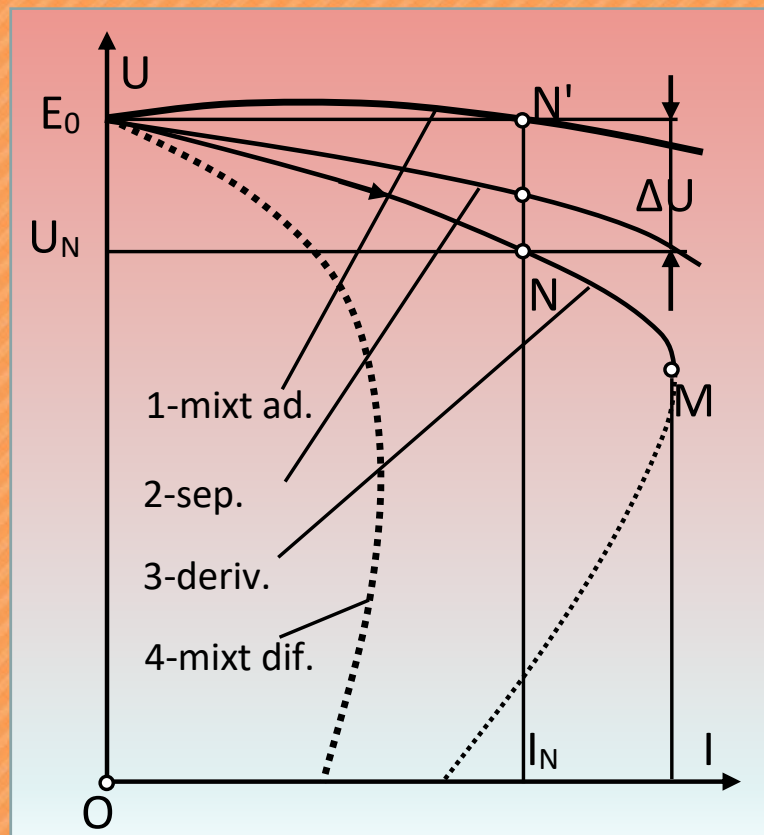
$$\Delta u^r = \frac{E_0 - U_N}{U_N} \cdot 100 \in (15 \div 30)\%$$

Caracteristica de reglaj



Având în vedere scăderea mai pronunțată a tensiunii la bornele mașinii odată cu creșterea sarcinii este evident că, pentru menținerea tensiunii constante este necesară o creștere mai pronunțată a curentului de excitație (curba 2).

Caracteristica externă



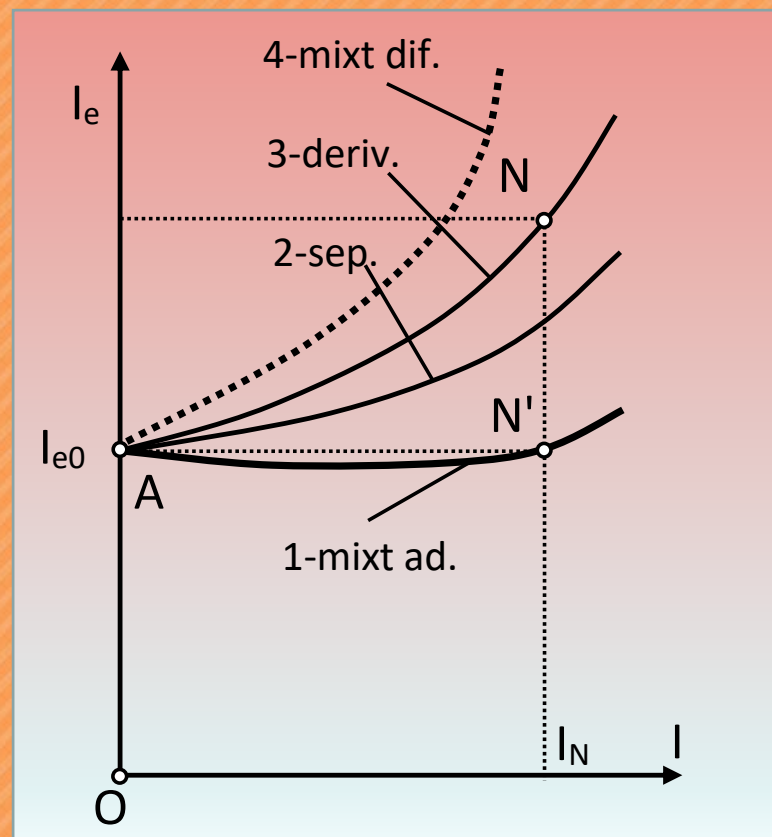
Expresia tensiunii la bornele mașinii se scrie sub forma:

$$U_A = E - R_A \cdot I_A - \Delta U_p = k_e \cdot n \cdot (\phi_{deriv} \pm \phi_{serie}) - R_A \cdot I_A - \Delta U_p$$

În cazul mașinii cu montaj adițional, odată cu creșterea sarcinii se intensifică și fluxul serie care determină creșterea fluxului total în mașină și deci creșterea ușoară a tensiunii la borne – curba 1.

În cazul mașinii cu montaj diferențial, odată cu creșterea sarcinii are loc o scădere pronunțată a fluxului total în mașină, ceea ce determină o scădere abruptă a tensiunii la borne – curba 4. Acest mod de variație este potrivit funcționării generatorului cu excitație mixtă diferențială ca *generator de sudură*.

Caracteristica de reglaj

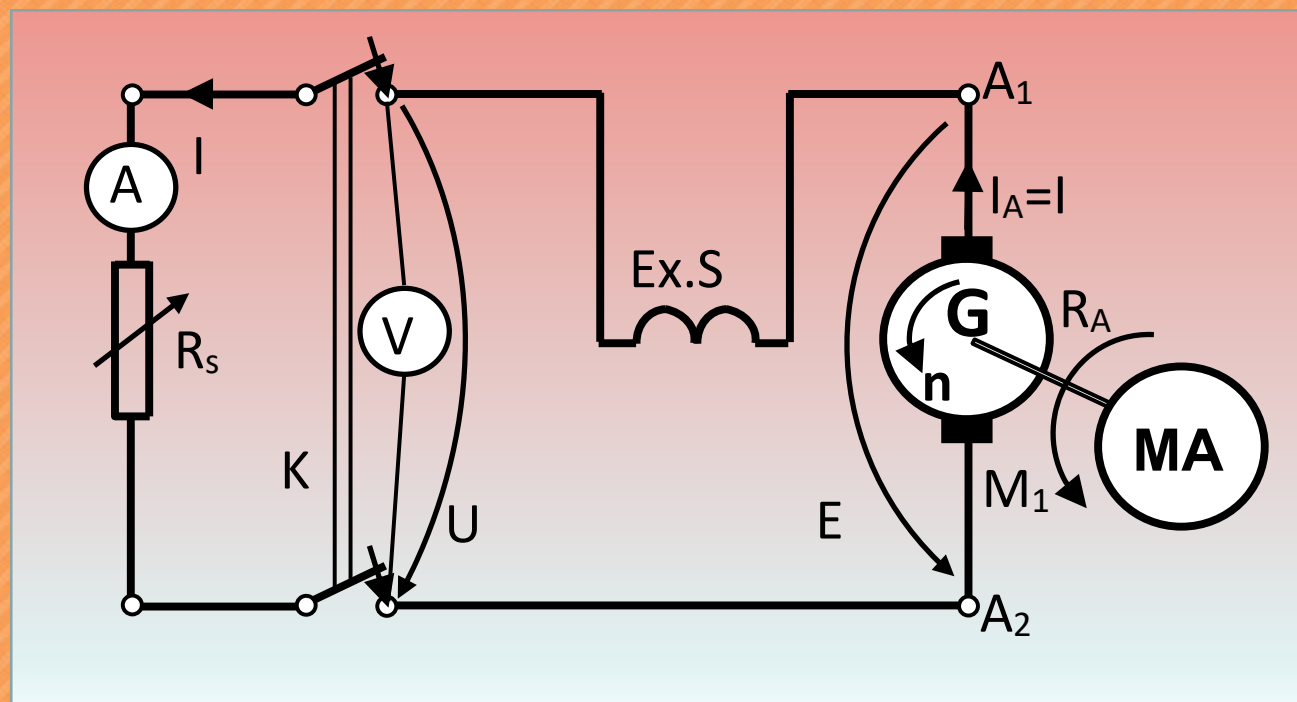


Caracteristicile de reglaj confirmă caracteristicile externe prin modul de variație a curentului de excitație necesar menținerii constante a tensiunii la borne.



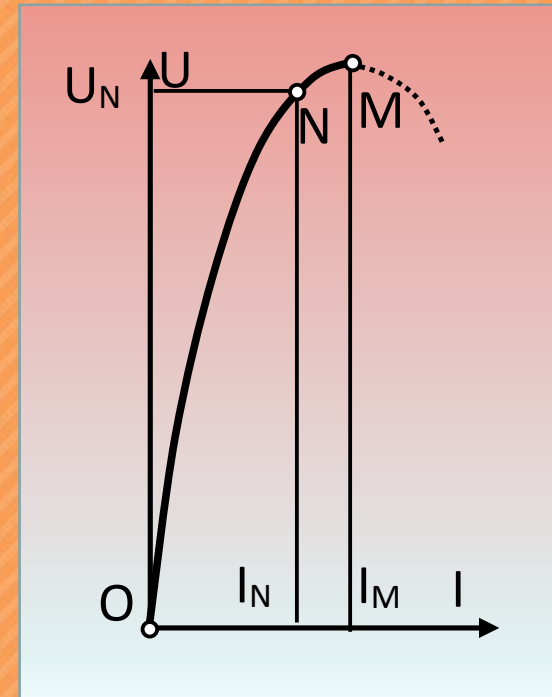
Caracteristicile montajului mixt sunt influențate și de ponderea celor două înfășurări de excitație; de regulă, aceste înfășurări nu creează fluxuri de excitație identice. Este posibil ca preponderent să fie fluxul înfășurării derivație (cel mai adesea) sau cel al înfășurării serie.

IV. Generatorul cu excitație serie



La mașina cu excitație serie, fenomenul de autoexcitare poate avea loc numai în sarcină (întrerupătorul K este închis) și evident depinde de valoarea rezistenței de sarcină.

Caracteristica externă

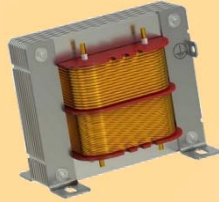


La generatorul cu excitație serie se poate trasa numai caracteristica externă care are o alură complet diferită – tensiunea la borne crește odată cu creșterea sarcinii (datorită creșterii fluxului de excitație).

De regulă, generatorul cu excitație serie nu are o utilizare concretă.

Cuvinte cheie

- **Generator = regim de funcționare**
- **Caracteristica externă**
- **Caracteristica de reglaj**
- **Amorsare (autoexcitare)**



TRANSFORMATORUL ELECTRIC



Curs 8



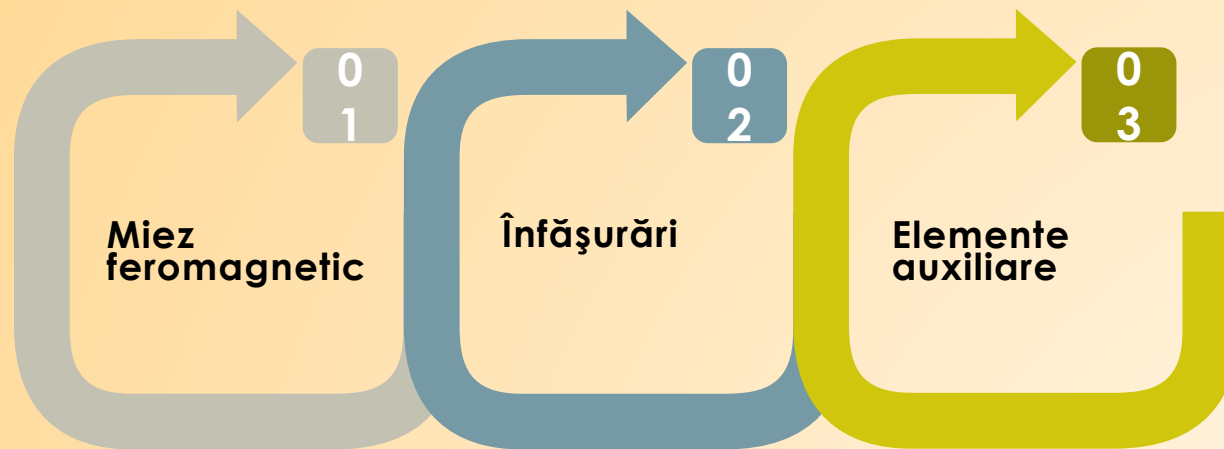


**Transformatorul este un aparat static ce realizează
modificarea valorii mărimilor electrice ale puterii
(*TENSIUNE* și *CURENT*),**

in curent alternativ

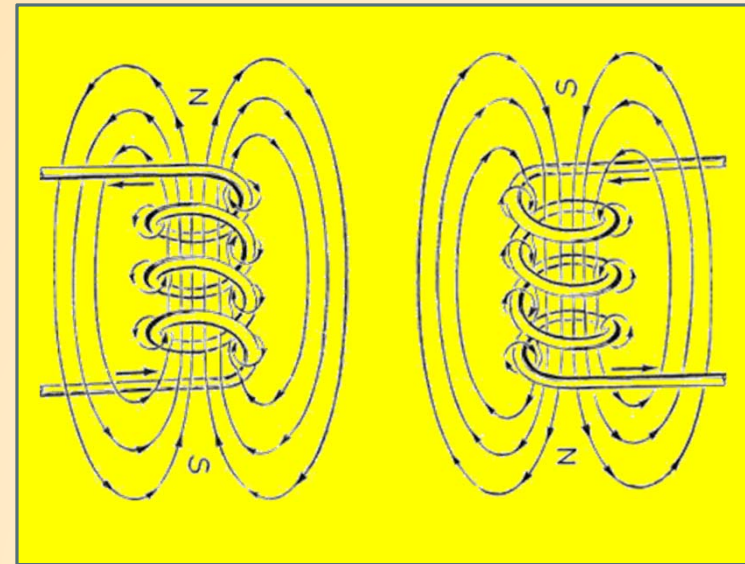
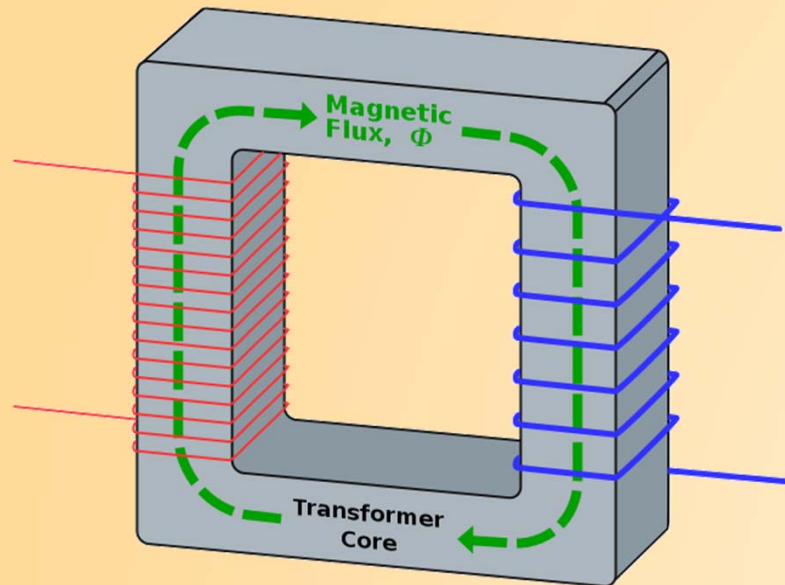
FRECVENȚA* rămânând însă **NEMODIFICATA*

ELEMENTE CONSTRUCTIVE



I. Miezul feromagnetic

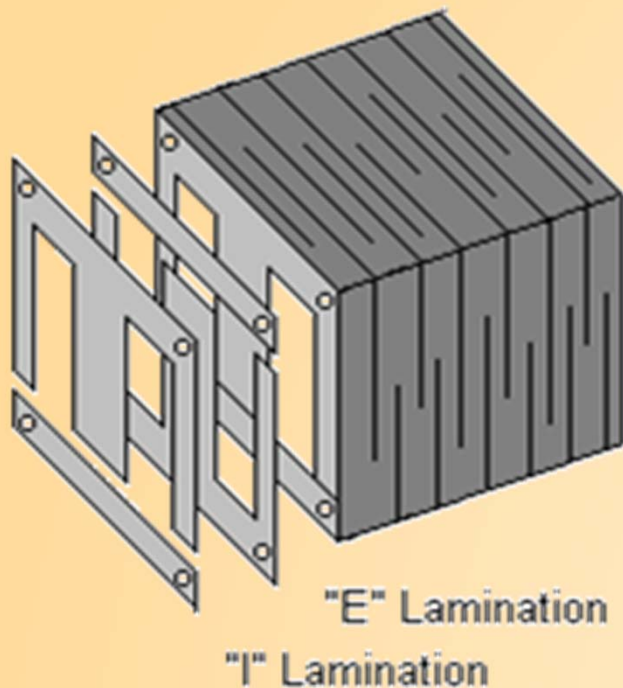
Reprezintă suportul pe care sunt plasate înfășurările transformatorului având însă ca rol principal crearea traseului de închidere a liniilor de câmp. Practic, câmpul creat de înfășurarea primară este „condus” pe trasee de reluctanță minimă către înfășurarea secundară asigurându-se, în acest mod, condiții optime pentru aplicarea legii inducției electromagnetice.



Întrucât câmpurile create de înfășurările transformatorului sunt alternative, miezul magnetic al transformatoarelor este ÎNTOTDEAUNA realizat din tole.

Tolele sunt izolate între ele (au la suprafața lor o izolație ceramică) astfel încât valoarea curenților turbionari scade semnificativ, scăzând, drept urmare, și pierderile în fier prin curenți turbionari.

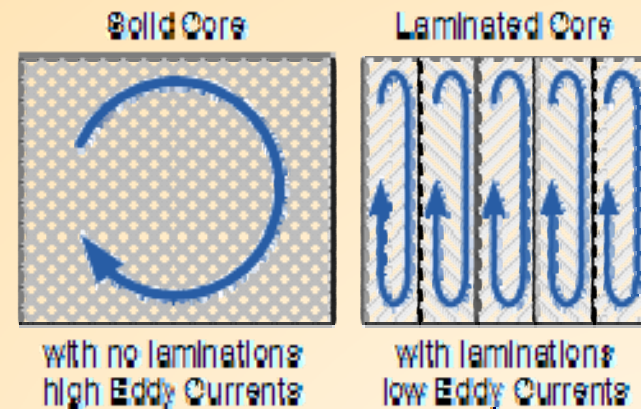
Grosimea tolelor este cuprinsă între 0,2-0,5 mm.



a. Miez magnetic realizat din tole E+I

Miez magnetic masiv

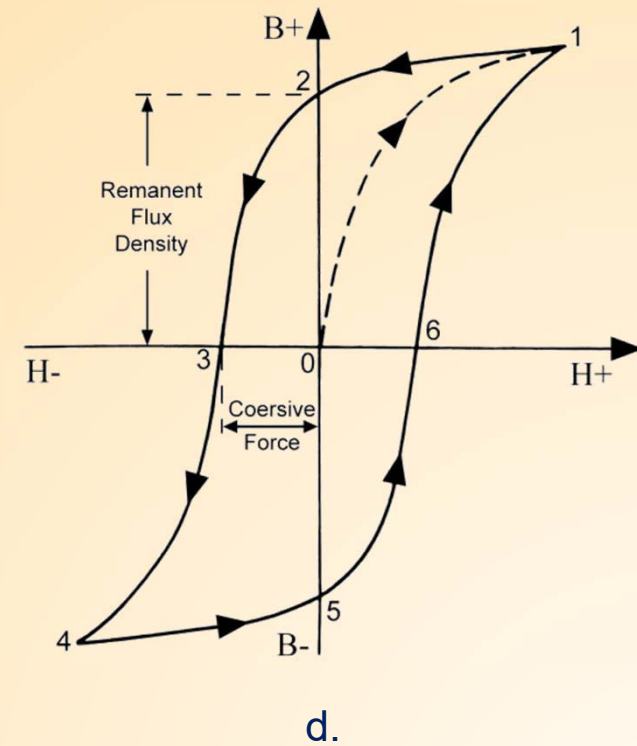
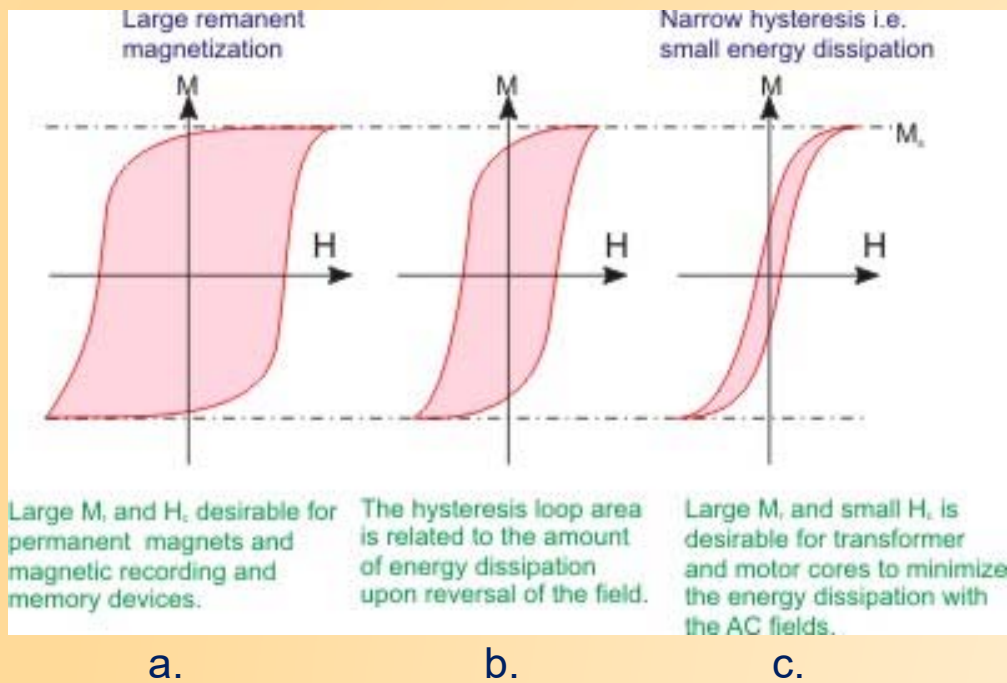
Miez magnetic din tole



b. Explicativa la prezența curenților turbionari în miezurile magnetice

Proprietățile materialelor feromagnetice sunt descrise cel mai bine de curba de histerezis. Aceasta pune în evidență inducția remanentă (punctul 2), câmpul coercitiv (punctul 3) și valoarea inducției de saturație (punctul 1) – figura d.

În cazul transformatoarelor, suprafața ciclului de histerezis trebuie să fie cât mai mică astfel încât pierderile în fier să fie cât mai mici. Materialul din figura c. este utilizat la construcția miezului feromagnetic.



Din punctul de vedere al tehnologiei utilizate, tolele circuitului magnetic provin din:

- **Tabla laminata la rece cu cristale neorientate -**
 $p_{10/50}=2-3 \text{ W/kg}$
- **Tabla laminata la rece cu cristale orientate –**
 $p_{10/50}=0,4-1,2 \text{ W/kg}$

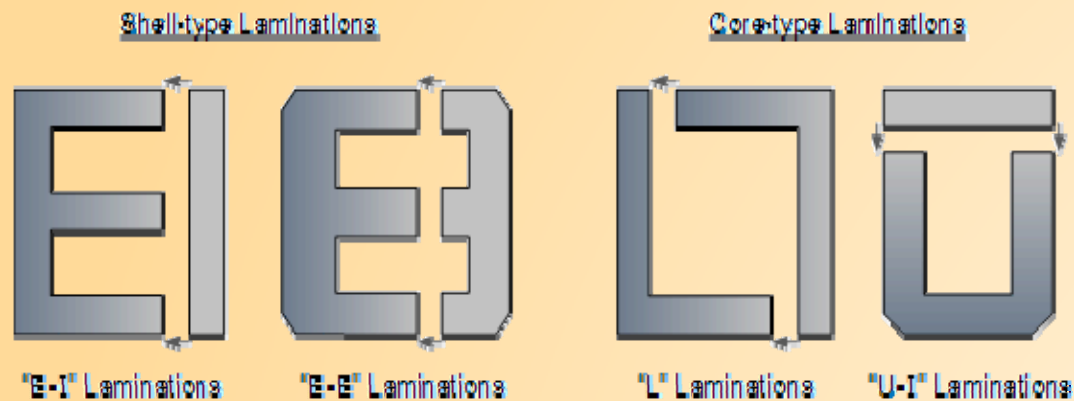
Tabla laminată la rece cu cristale neorientate este cea mai utilizată soluție, întrucât este mai ieftină iar pierderile specifice în fier ($p_{10/50}$) sunt relativ scăzute.

Tabla laminată la rece cu cristale orientate are o calitate superioară având pierderile specifice de până la opt ori mai mici.

Circuitul magnetic al transformatoarelor, denumit și miez magnetic, este format din două elemente constructive:

- coloane – sunt porțiunile din miez pe care sunt plasate înfășurările;
- juguri – sunt porțiunile rămase din miez care închid circuitul magnetic.

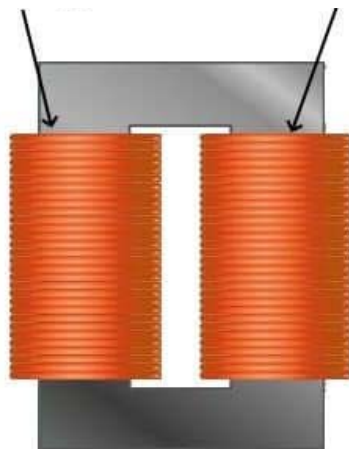
Transformatoarele monofazate de mică putere au circuitul magnetic realizat din tole având forma literelor E, I, L și U. Figurile de mai jos pun în evidență modul de asamblare a circuitului magnetic închis.



Transformatoarele monofazate pot fi construite in trei variante:

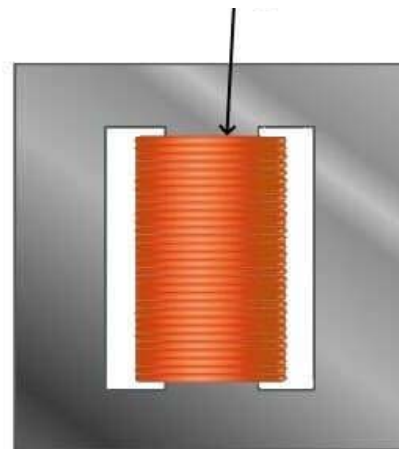
- Transformatoare in manta: înfășurările sunt plasate pe o singură coloană, restul miezului magnetic reprezentând juguri;
- Transformatoare in coloane: înfășurările primare si secundare sunt plasate pe coloane diferite.
- Transformatoare toroidale: miezul este un inel continuu pe care sunt plasate (pe zone distincte sau suprapuse) cele două înfășurări.

Înfășurare primara Înfășurare secundara

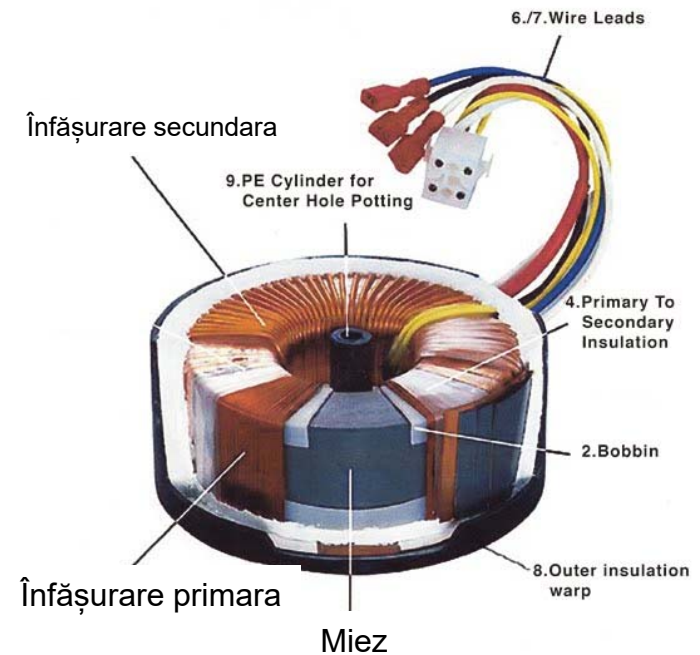


Transformator
in coloane

Înfășurări primara si
secundara

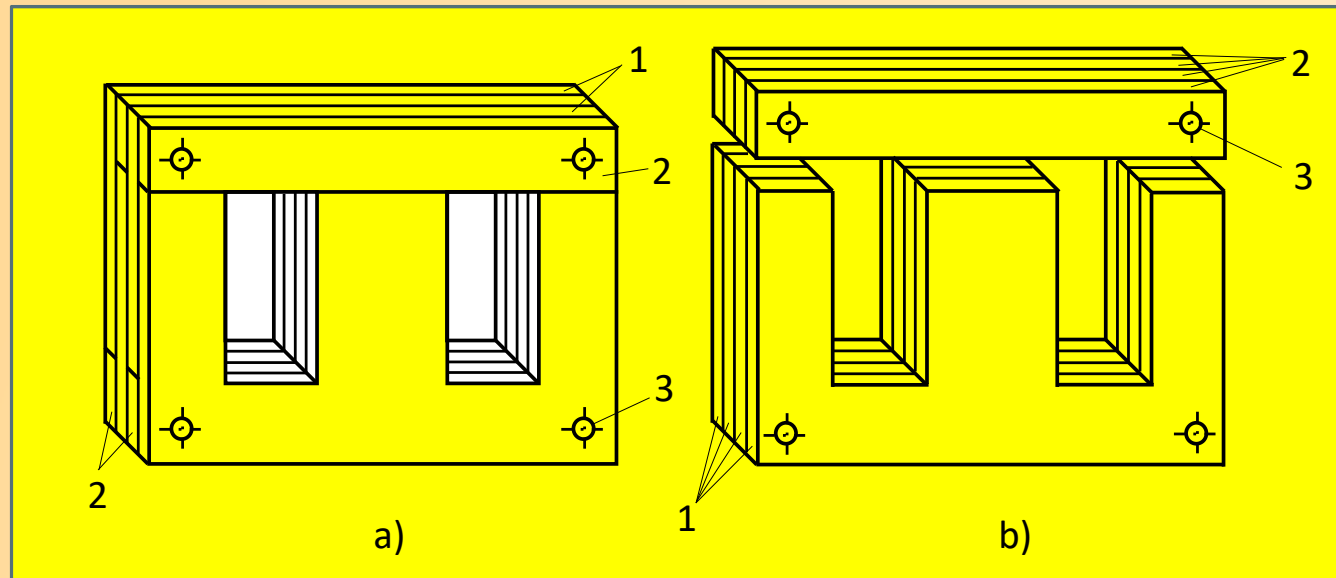


Transformator
in manta



Realizarea miezurilor se poate face prin două procedee:

- a) Prin întrețesere: tolele sunt întrețesute alternativ (în cazul din figură se întrețesund tolele E cu tolele I)
- b) Prin suprapunere: porțiunile de circuit magnetic sunt realizate separat și apoi asamblate împreună.

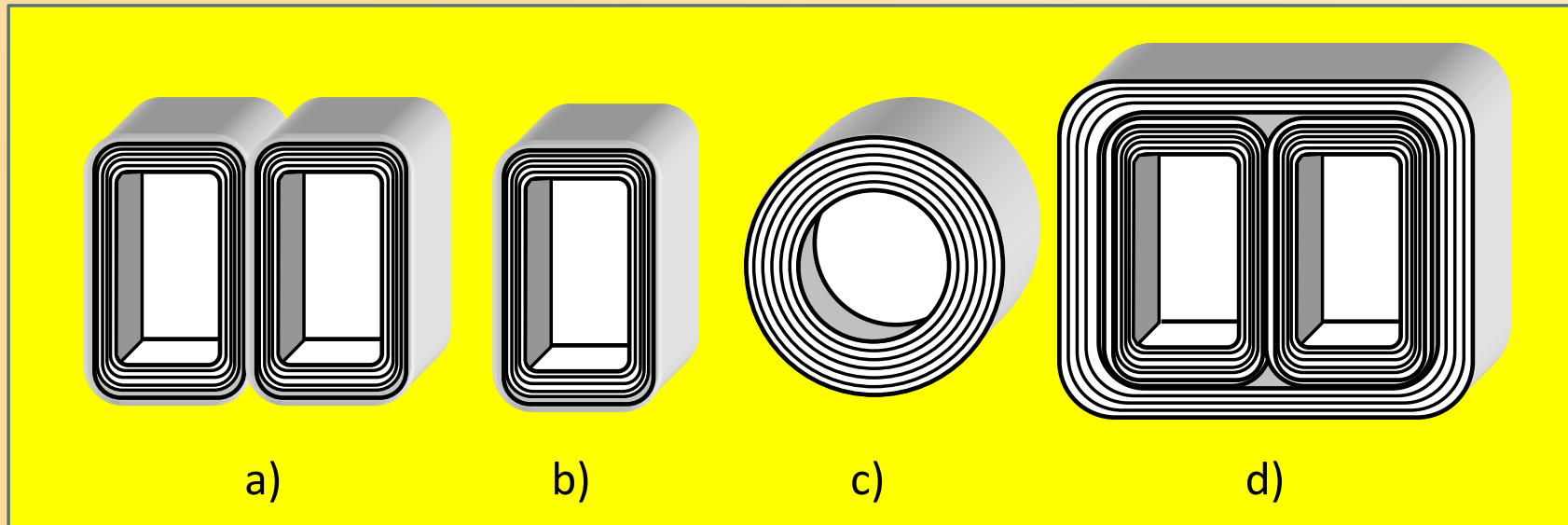


Dispunerea tolelor în miezul magnetic al transformatorului

a) prin întrețesere; b) prin suprapunere;

1 – tole de forma literei E, 2 – tole de forma literei I, 3 – găuri pentru buloane de strângere

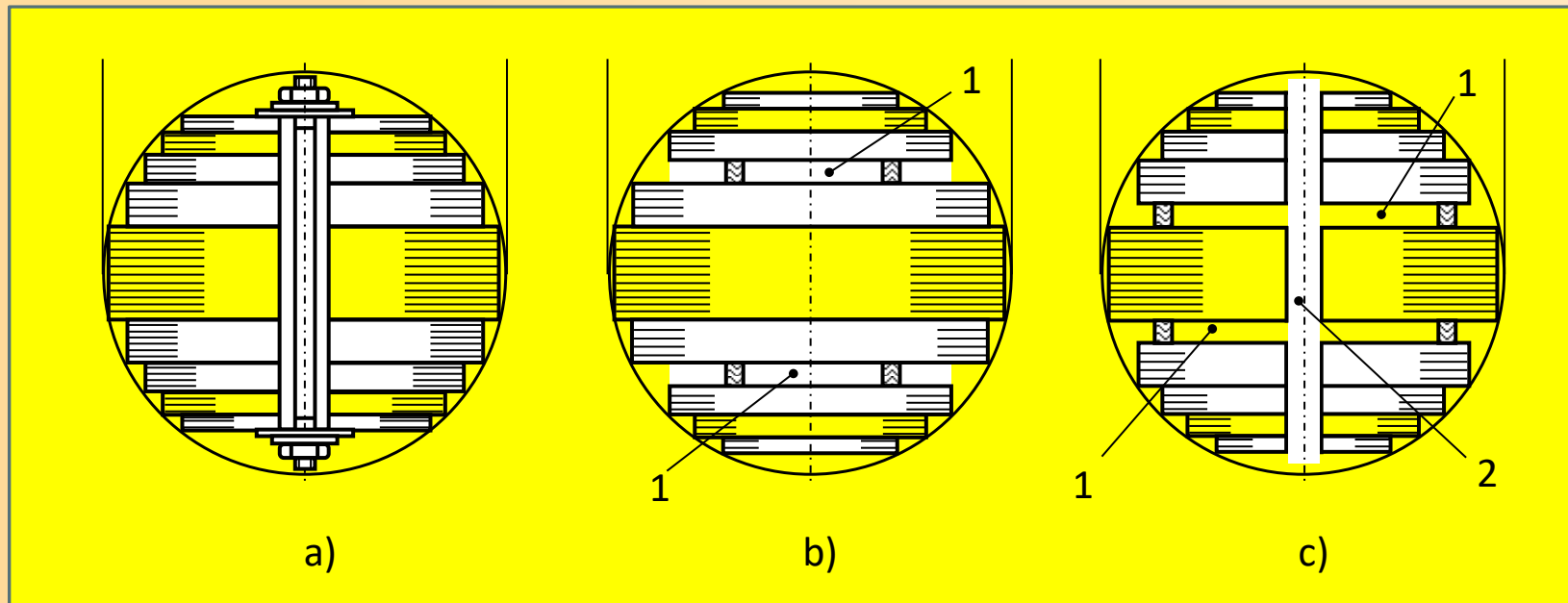
În ultima vreme, se folosesc din ce în ce mai mult benzi magnetice (adică tablă feromagnetică sub forma de benzi) pentru realizarea miezurilor magnetice. Tehnologic este utilizată tablă cu cristale orientate astfel încât performanțele acestor transformatoare sunt foarte bune.



Miezuri din benzi magnetice

a) în manta, b) cu coloane, c) toroidal, d) pentru transformator trifazat

În cazul transformatoarelor trifazate de putere, coloanele sunt realizate din mai multe trepte, astfel încât secțiunea unei coloane NU este dreptunghiulară ci se poate înscrie într-un cerc. În plus, se pot realiza canale longitudinale și transversale de răcire.



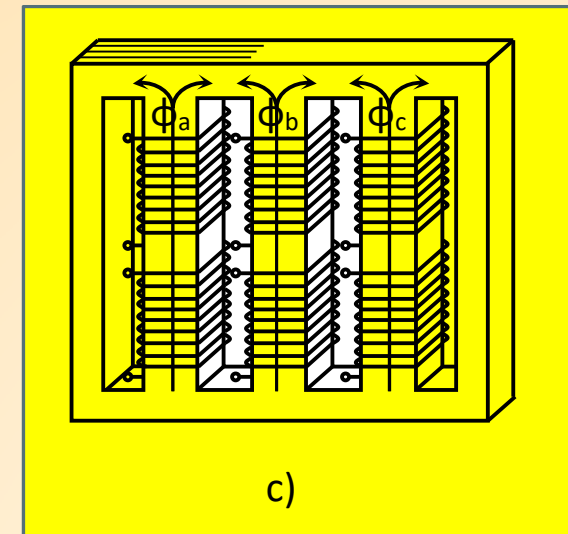
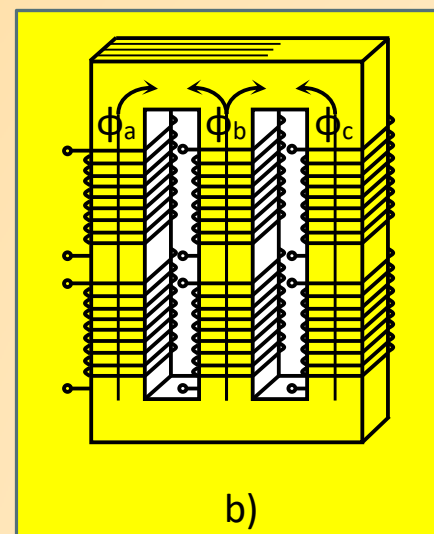
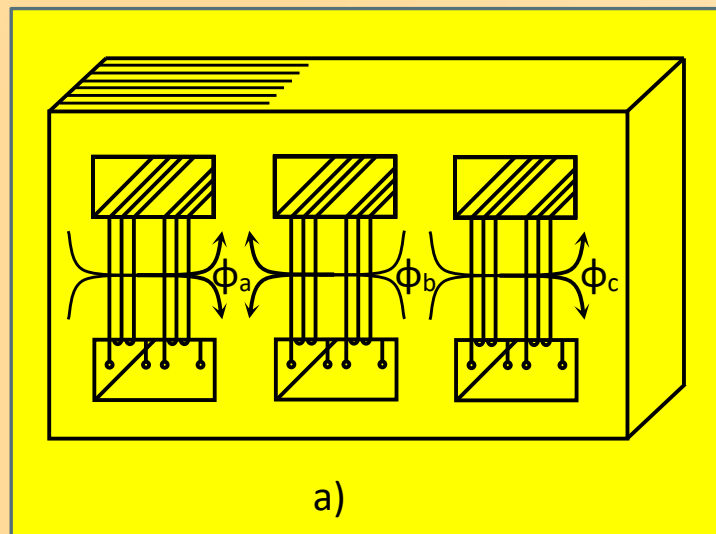
Secțiuni transversale ale coloanelor transformatoarelor de mare putere
1 – canal longitudinal de răcire, 2 – canal transversal de răcire



Miez de transformator trifazat de putere având coloanele realizate „in trepte”.

Si in cazul transformatoarelor trifazate există variantele constructive in manta (a) și cu coloane (b, c).

La variantele in manta (a) și cu cinci coloane (c), fluxurile se închid simetric prin circuitul magnetic. La varianta cu trei coloane (b), fluxurile se închid „forțat” prin cele trei coloane, existând o încărcare neuniformă a circuitului magnetic.



Variante de miezuri pentru transformatoare trifazate

a) în manta, b) cu trei coloane (compact, asimetric), c) cu cinci coloane

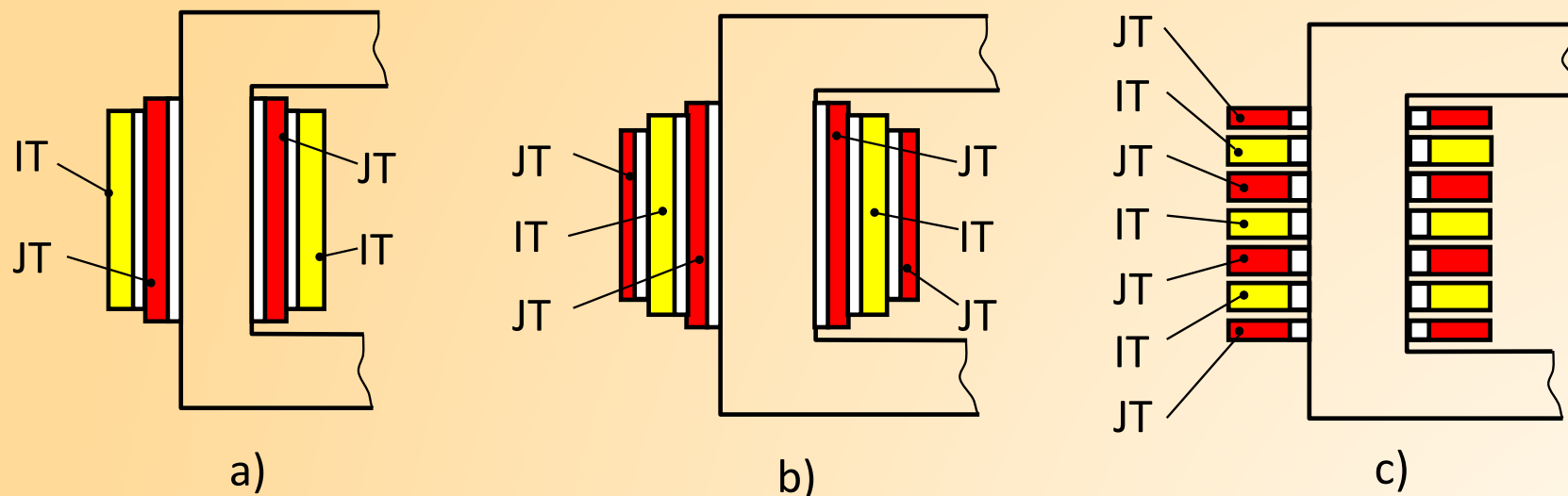
II. Înfășurări

Reprezintă circuitul electric al transformatorului, respectiv sistemul care primește energie în curent alternativ cu anumiți parametri de la o sursă și o cedează cu parametri schimbați (tensiune și curent) către un receptor.

Înfășurarea conectată la sursă se numește *înfășurare primară* iar cea conectată la receptor, *înfășurare secundară*.

În funcție de valoarea tensiunii la bornele fiecărei înfășurări, acestea se clasifică în înfășurări de înaltă tensiune (IT) și înfășurări de joasă tensiune (JT).

Atenție: nu întotdeauna primarul este înfășurarea de înaltă tensiune.



Variante de înfășurări la transformatoare

- a) înfășurări cilindrice concentrice, b) înfășurări cilindrice biconcentrice,
c) înfășurări alternate (cu galeți alternați)

Înfășurările sunt realizate pe un șablon sub forma unor bobine (rotunde sau dreptunghiulare) – sunt așa numitele înfășurări de tip concentrat – și se montează ulterior pe coloanele miezului magnetic. Ele se realizează din conductoare de cupru (cel mai adesea) sau aluminiu (adică materiale cu rezistivitate electrică mică). Conductoarele au la suprafața lor un strat izolator (cel mai adesea email dar poate fi strat izolator pe bază de sticlă sau rășini rezistente la temperatură).

Bobinele se obțin prin depănarea conductoarelor pe unul sau mai multe straturi suprapuse dar izolate între ele cu carton special.

Conductoarele au profil rotund (a) sau dreptunghiular (b) – pe măsura creșterii curentului din înfășurare se trece de la profilul rotund la cel dreptunghiular.



a)

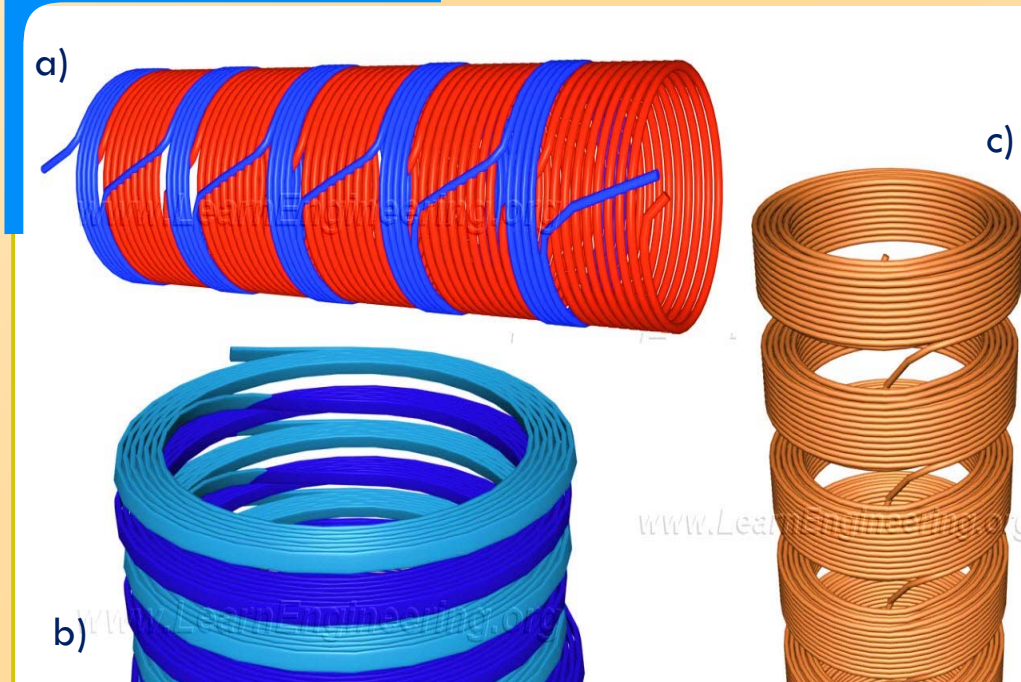


b)

Exista situații in care, in locul conductoarelor este folosită o bandă (folie) conductoare din cupru sau aluminiu. Lățimea benzii corespunde cu înălțimea bobinei. Intre straturi se pune carton izolant.



Clasificare



a) *Înfășurare cilindrică stratificată*, care constă în realizarea unor bobine prin așezarea una lângă alta a spirelor pe înălțime, urmată de o trecere în stratul următor și continuarea bobinării prin așezarea una lângă alta a spirelor, parcurgând înălțimea în sens contrar stratului anterior, ș.a.m.d.

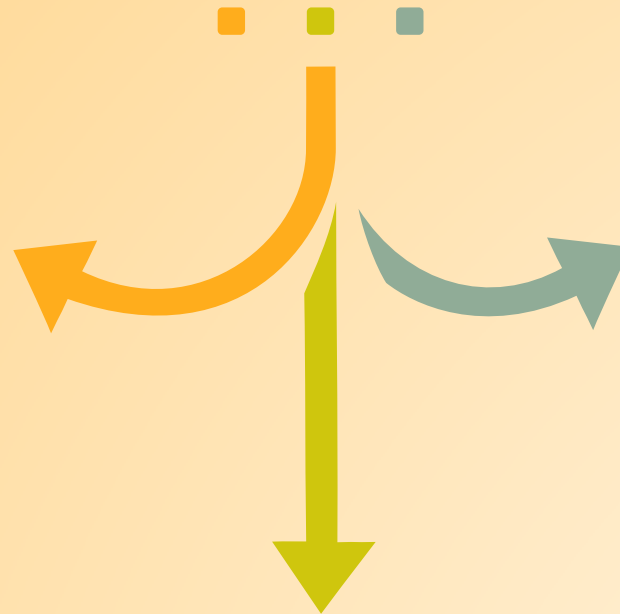
b) *Înfășurare cilindrică elicoidală*, cu spire plasate unele sub altele pe înălțime, care se realizează cu unul, două sau mai multe începuturi, spirele conținând unul sau mai multe conductoare suprapuse și legate în paralel. După realizarea primului strat (interior) într-un sens, se face trecerea conductoarelor peste cilindrul izolant și se execută bobinarea stratului următor ajungându-se din nou în partea superioară a ansamblului.

c) *Înfășurare în galeți*, care se poate executa cu *galeți separați* din conductoare cu secțiune circulară, sau cu *galeți continui* (numită și spiralată) din conductoare cu secțiune dreptunghiulară. Înfășurarea în galeți continui se poate realiza printr-un procedeu tehnologic care nu implică întreruperea conductorului. Galetul este o porțiune de înfășurare bobinată sub forma unui disc cu diametre diferite ale spirelor.

ELEMENTE AUXILIARE

Schela

Accesorii



Constructia metalica

a) Schela

Reprezintă ansamblul construcției ce realizează strângerea jugurilor miezului magnetic, consolidarea înfășurărilor, ridicarea părții decuvabile și este formată din profiluri din oțel, tiranți, inele de presare, etc.



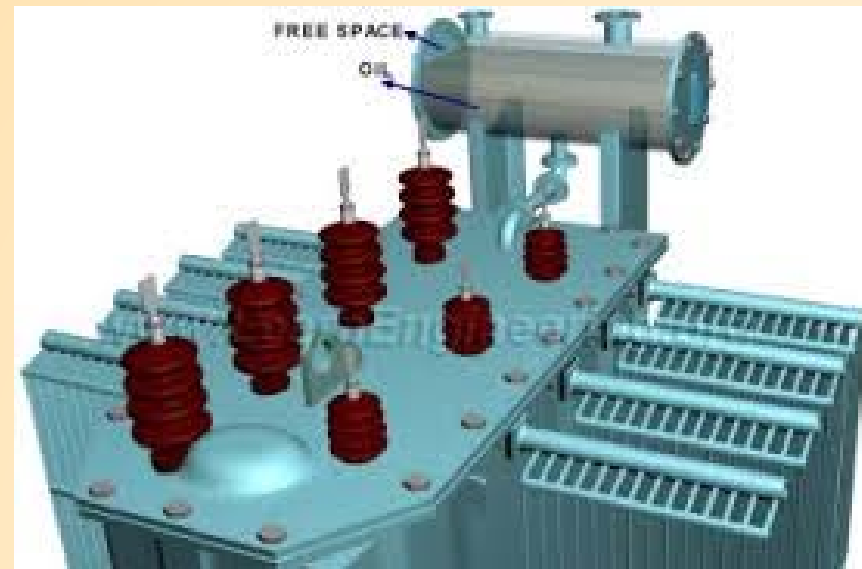
b) Construcția metalică

Apare numai la transformatoarele în ulei și conține trei elemente: cuvă, capac și conservator.

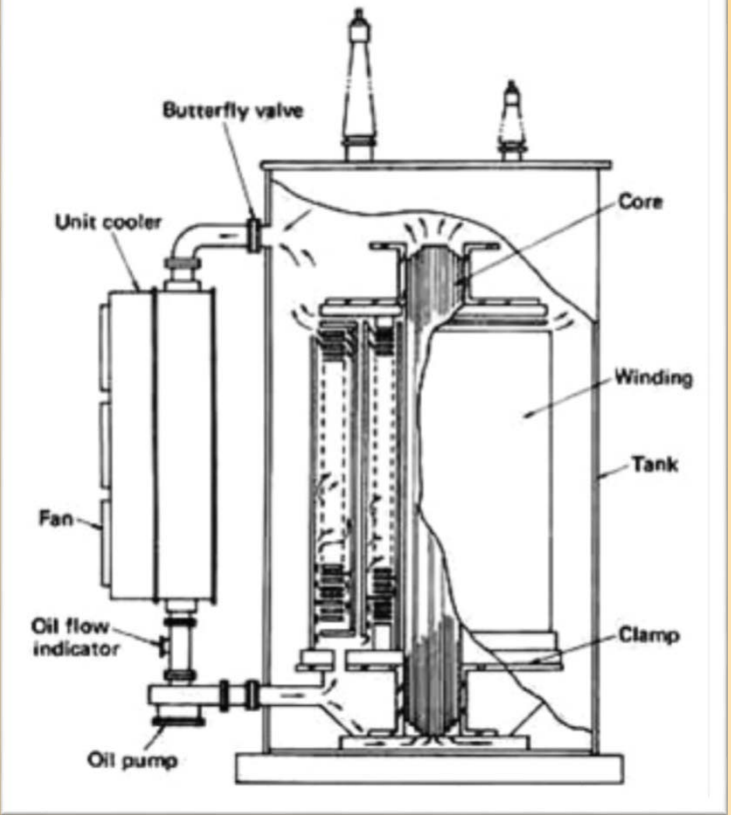
Cuva este un recipient din oțel care se umple cu ulei de transformator și în care este scufundat miezul și înfășurările. Acest recipient este închis ermetic cu ajutorul *capacului*.

În funcție de puterea transformatorului, cuva poate avea pe exterior radiatoare sau țevi sudate prin care să circule un agent de răcire (apa, aer).

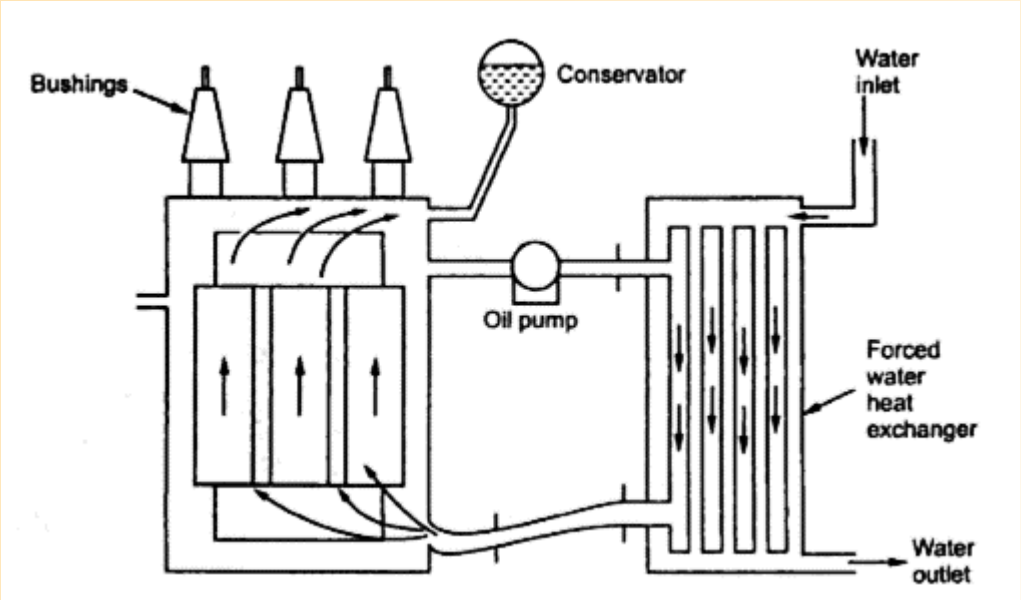
Conservatorul - este un vas de expansiune a uleiului din cuvă, atunci când acesta se încălzește. Asigură, de asemenea, o suprafață de contact diminuată a uleiului cu aerul).



Răcire cu aer a uleiului din cuvă



Răcire cu apă a uleiului din cuvă

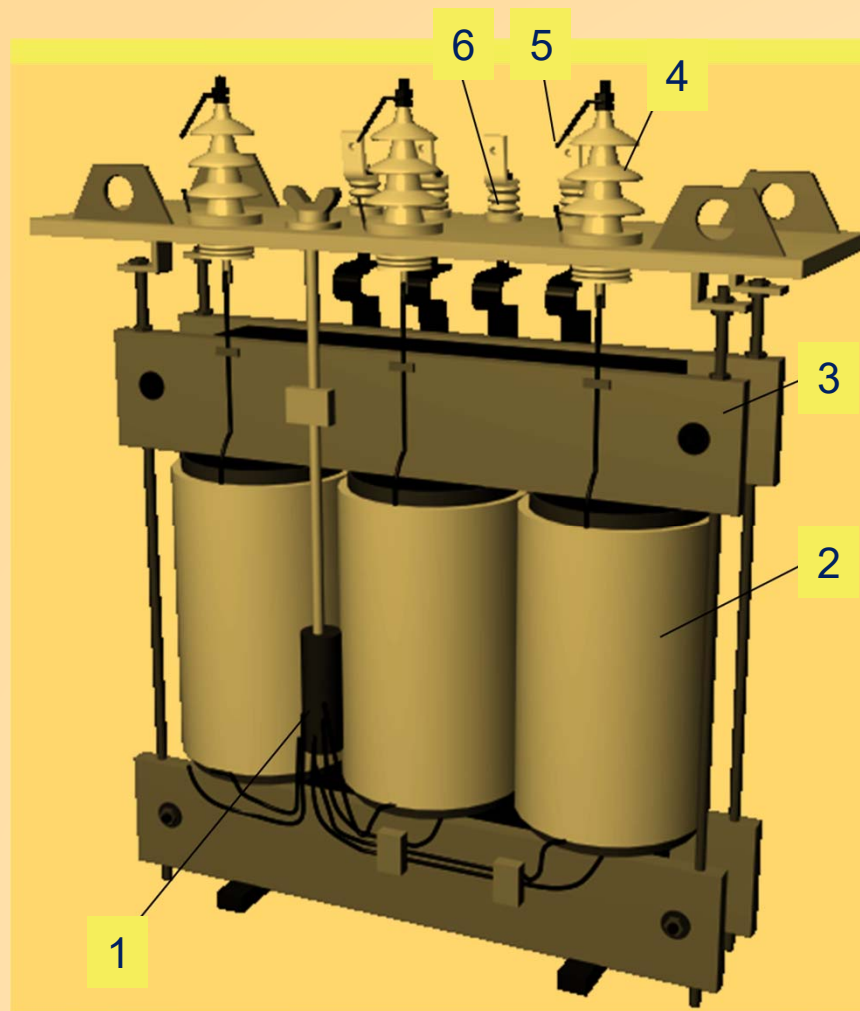




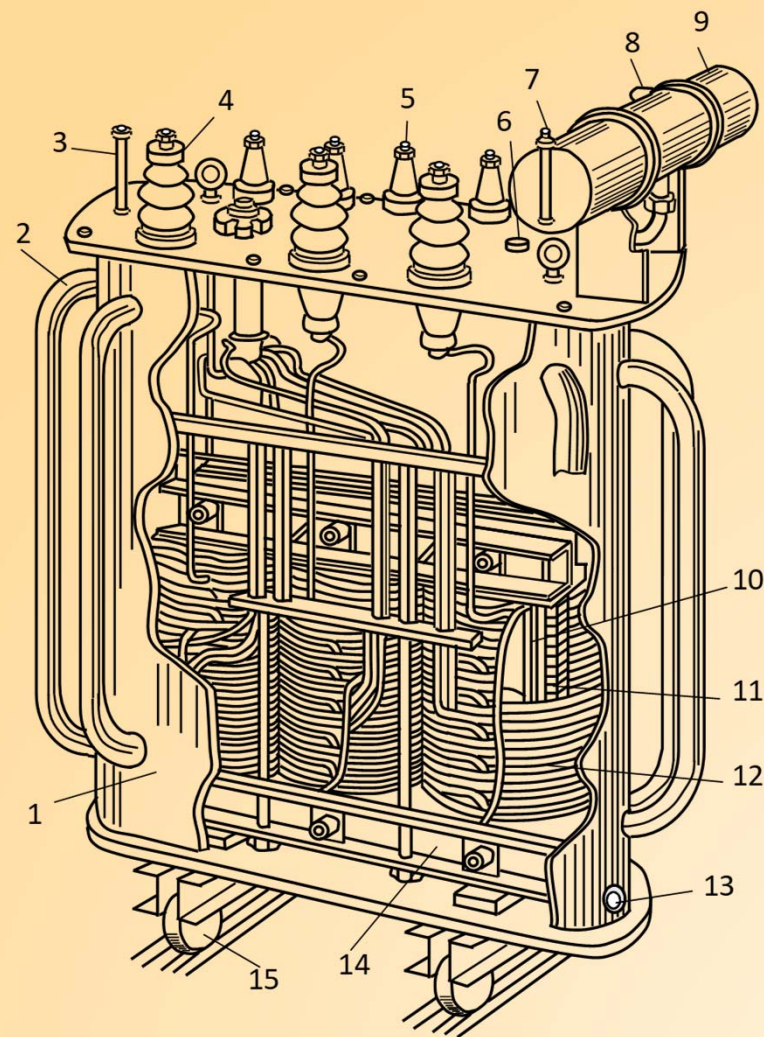
Transformatoare de putere (1000 kVA) cu ulei si răcire naturala prin țevi

c) Accesorii

- Izolatoare de trecere: servesc la trecerea conductoarelor prin capacul cuvei. Sunt realizate dintr-o parte izolanta (de obicei porțelan) și o parte conductoare;
- Releul de gaze (Bucholtz): este un element de protecție ce sesizează apariția gazelor produse prin descompunerea uleiului din cuva în urma apariției unor defecte. În cazul unei cantități crescânde de gaze, releul poate comanda deconectarea transformatorului atât pe partea de IT cât și pe JT;
- Supapa de siguranța: Asigură evacuarea în cazul unei degajări bruște de gaze sau când crește presiunea în cuva transformatorului;
- Filtrul de aer: izolează uleiul de influența atmosferei exterioare (umiditate, impurități). Se montează pe conducta dintre conservator și mediu și conține o substanță higroscopică;
- Comutator de reglare a tensiunii: este opțional și este utilizat când există ploturi de modificare a tensiunii;
- Indicator de temperatură: pentru măsurarea și afișarea temperaturii uleiului.



Elementele constructive ale părții decuvabile la un transf. de 1000 [kVA], 10[kV]/0,4[kV]
1- Comutator de ploturi, 2- Înfășurare de IT, 3- Schelăria jugului, 4- Izolator de trecere de IT, 5- Eclator (descărcător de supratensiuni), 6- Izolator de trecere de JT



Elementele constructive ale unui transformator de 300[kVA] și 6[kV] în ulei

1 – Cuvă, 2 – Țevi de răcire a uleiului, 3 – Termometru, 4 – Izolator de trecere de IT, 5 – Izolator de trecere de JT, 6 – Bușon de turnare a uleiului în cuvă, 7 – Indicator de nivel al uleiului, 8 – Bușon de turnare a uleiului în conservator, 9 – Conservator de ulei, 10 – Miez magnetic, 11 – Înfășurare de JT, 12 – Înfășurare de IT, 13 – Bușon de evacuare a uleiului, 14 – Schelărie metalică, 15 – Role de deplasare.

Notarea bornelor

Înfășurări de înaltă tensiune:

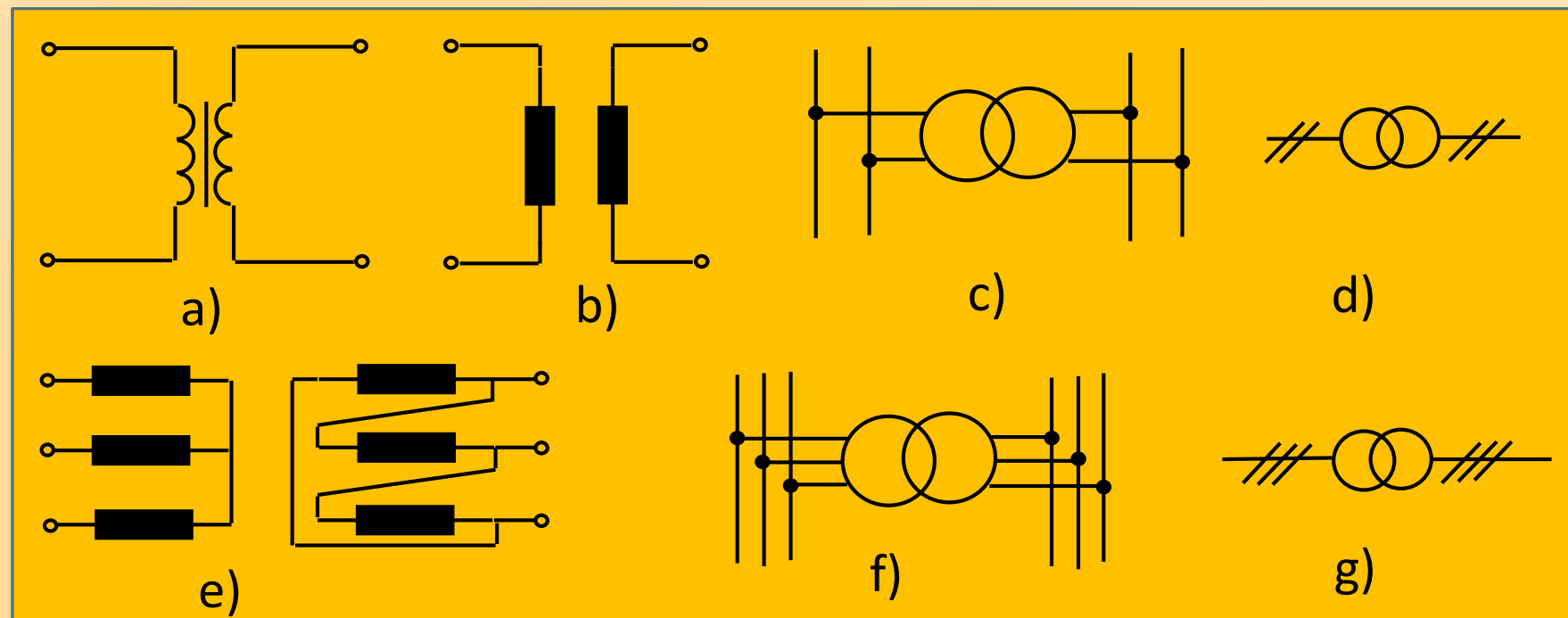
Începuturile: A, B, C

Sfârșiturile: X, Y, Z

Înfășurări de joasă tensiune:

Începuturile: a, b, c

Sfârșiturile: x, y, z

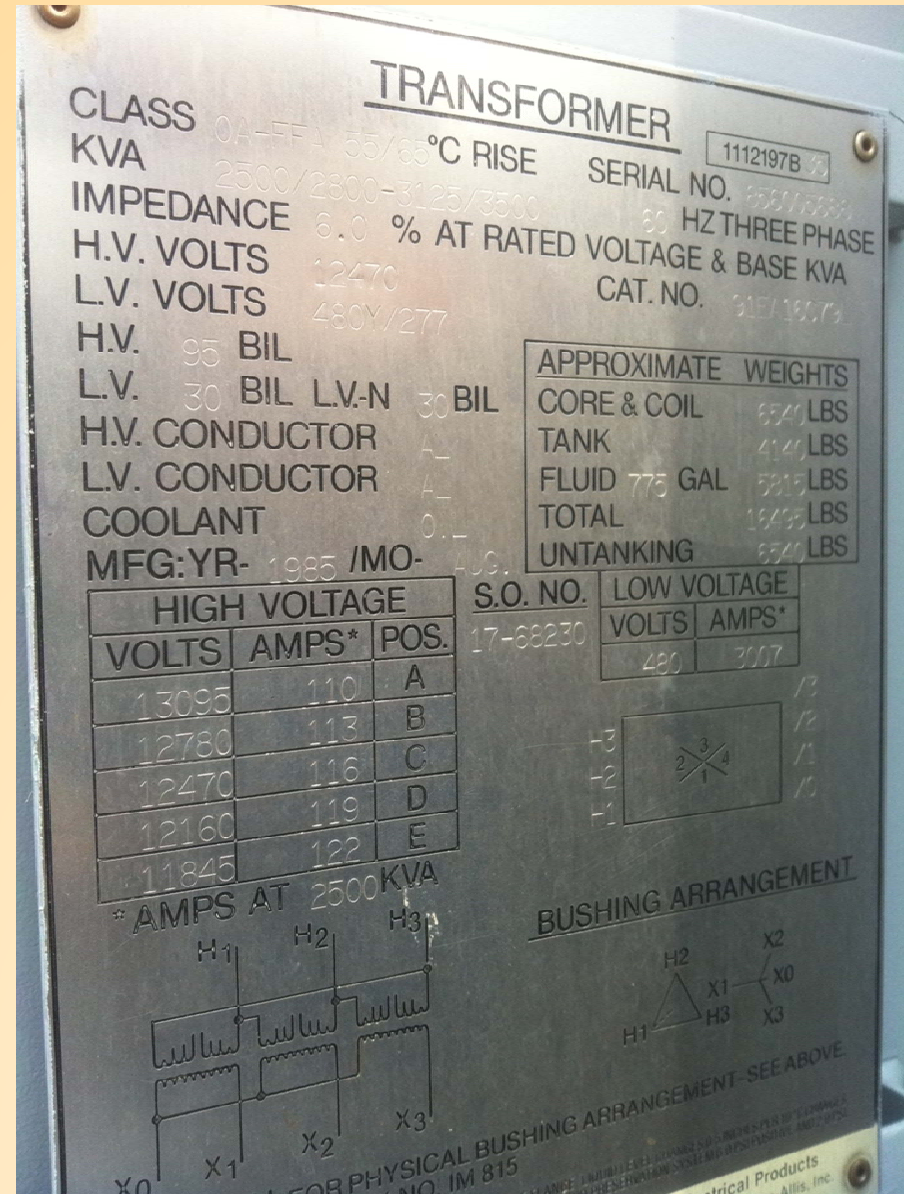
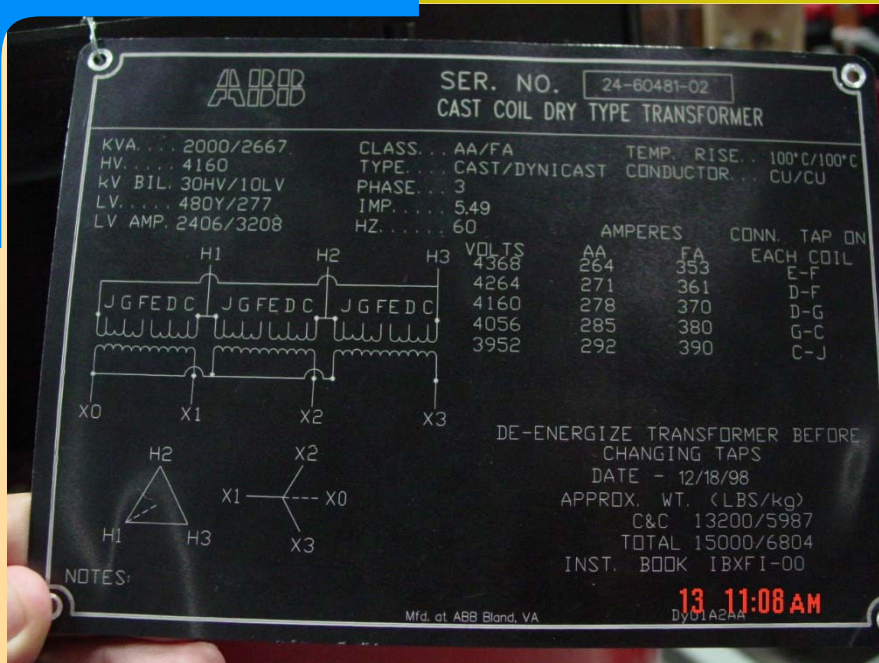


a...d) – transformator monofazat; e...g) transformator trifazat

Mărimi nominale

Caracterizează regimul de funcționare cu sarcina maximă care nu duce la depășirea temperaturii admisibile pentru perioada de funcționare stabilită.

1. **Puterea nominală, S_N [VA; kVA]** – puterea aparentă la bornele circuitului secundar
2. **Tensiunile nominale, U_{1N}, U_{2N} [V; kV]** – tensiunile de linie din circuitele primar și secundar
3. **Curenții nominali, I_{1N}, I_{2N} [A; kA]** – curenții de linie din circuitele primar și secundar
4. **Raportul de transformare**
5. **Frecvența nominală**
6. **Tensiunea nominală de scurtcircuit, u_{sc} [V; %]** – tensiunea aplicată circuitului primar pentru a fi parcurs de curentul nominal atunci când secundarul este în scurtcircuit
7. **Schema sau grupa de conexiuni**



S.No.	Description of Data to be given	Remarks for example
[1]	[2]	[3]
1.	Manufacturer's Name:	ABB/206788
2.	Manufacturer's Serial Number	224106
3.	Kind of Transformer	Power Transformer
4.	236839 Relevant Standard Year	I.S.P. S/B. SI/ IEC /DIS/JIS NEMA
5.	Year of Manufacture	2013
6.	Number of Phase	3
7.	Rated Power	1000kVA = 1MVA
8.	Rated Frequency:	50Hz
9.	Rated Voltages:	HV 33 kV, LV 11 kV,
10.	Rated Currents	HV _____, LV _____.
11.	Vector Group Symbol	
12.	% Impedance Voltage (At Rated Current)	
13.	% Reactance Voltage in %:	
14.	Types of Cooling	ONAM
15.	Total Weight	_____ Kg
	..Mass or insulating Oil	_____ Kg
	..Transportation Weight	_____ Kg
	..Untanking Weight	_____ Kg
16.	Insulating liquid (if Not Oil) Types:	
17.	Quantity of Oil (Liters):	
18.	Details about Tap-Changer	
19.	Rated insulation Level:	
20.	Power-Frequency withstand Voltage	kV(rms)
	Other	

CLASIFICARE

I. După destinație

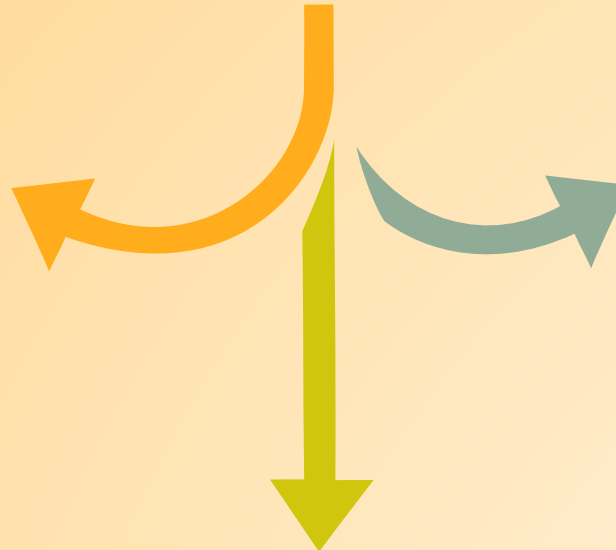
1. Transformatoare de putere
2. Transformatoare speciale

III. După modul de răcire

1. Transformatoare uscate
2. Transformatoare cu ulei

II. După numărul de faze

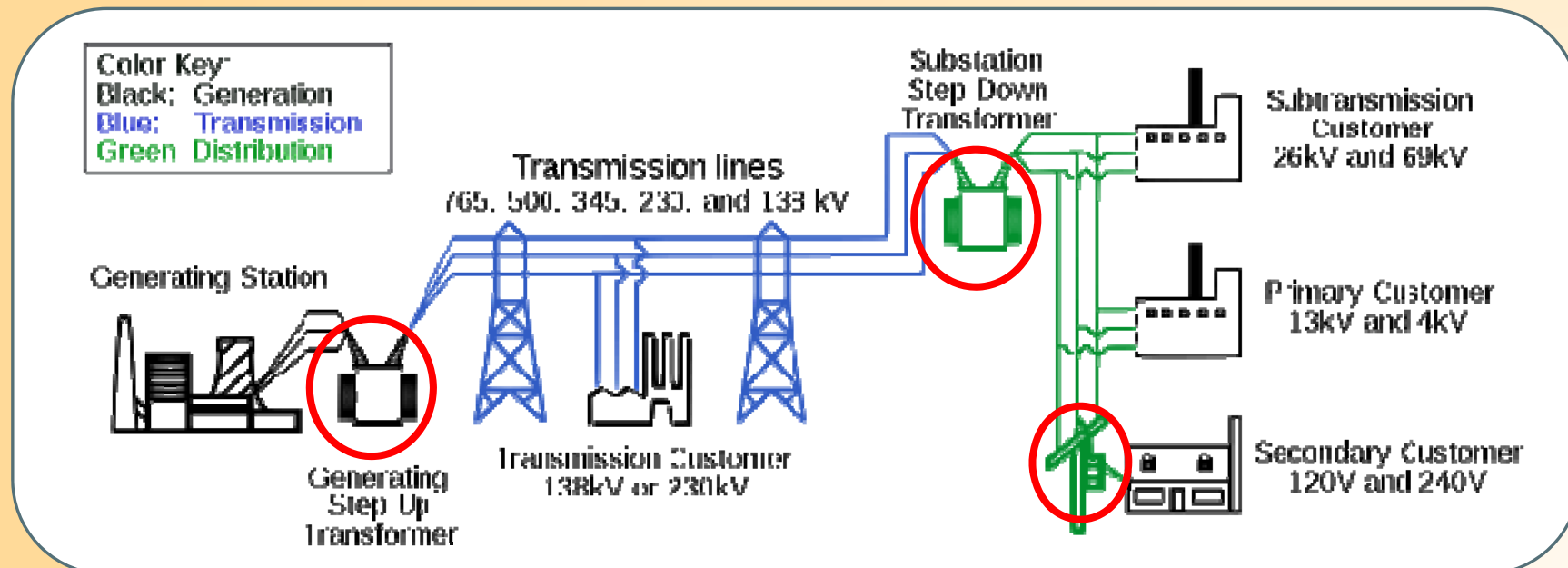
1. Transformatoare monofazate
2. Transformatoare trifazate



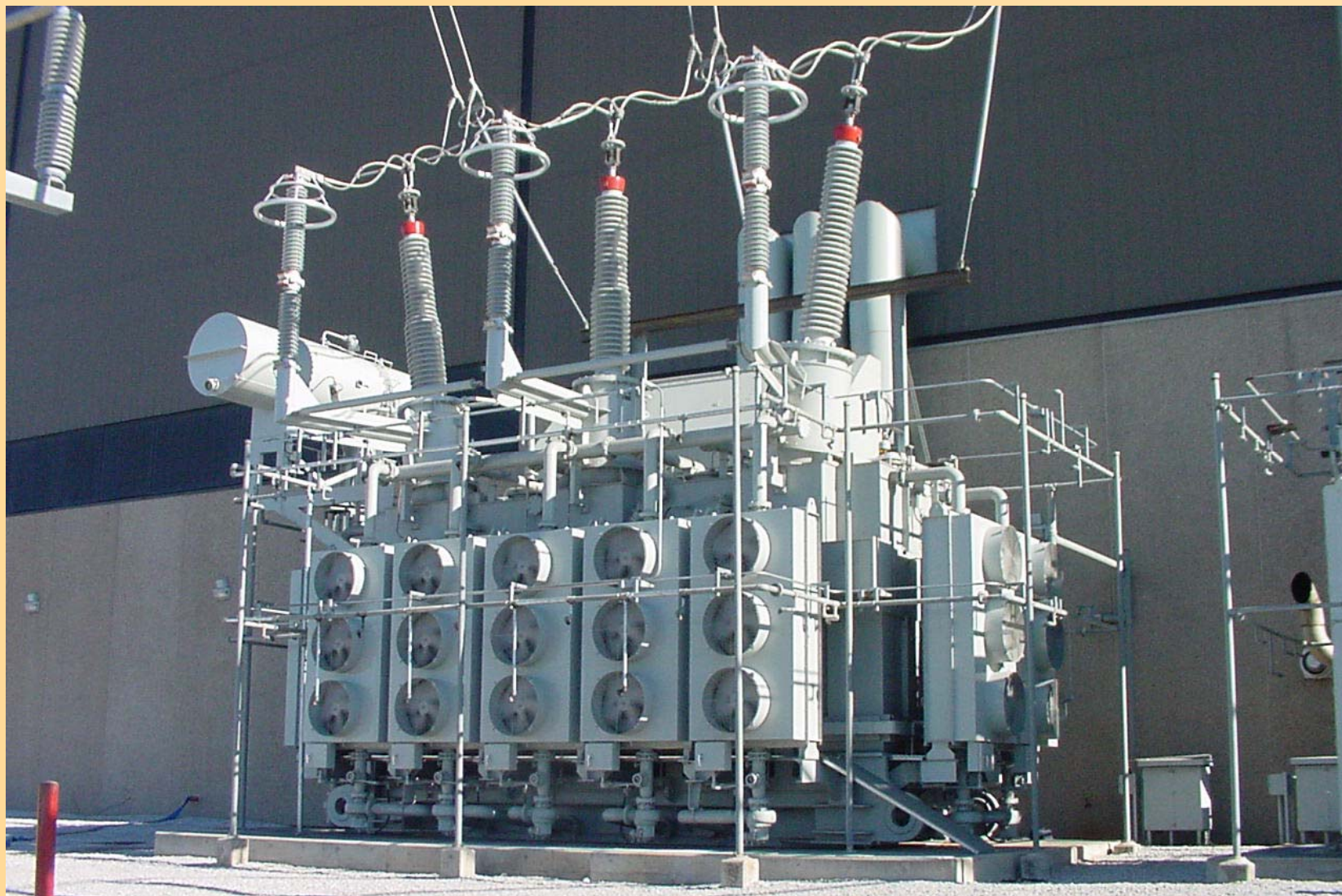
I. După destinație

1A. Transformatoare de putere

- sunt folosite in sistemele energetice pentru interconectarea unor rețele cu parametri electrici diferiți sau pentru alimentarea consumatorilor (întreprinderi, arii rezidențiale, etc)



Transformator de putere



1B. Transformatoare de distribuție



Transformatoarele de putere sunt utilizate la rețelele de transmisie a energiei electrice de înaltă tensiune ca unități ridicătoare și coborâtoare de tensiune (400 kV, 200 kV, 110 kV, 66 kV, 33kV) și sunt în general de puteri de peste 200 MVA.

Transformatoarele de distribuție sunt utilizate în rețelele de distribuție de joasă tensiune ca element final de furnizare a energiei electrice (11kV, 6.6 kV, 3.3 kV, 440V, 230V) și sunt în general de puteri sub 200 MVA.

2. Transformatoare speciale

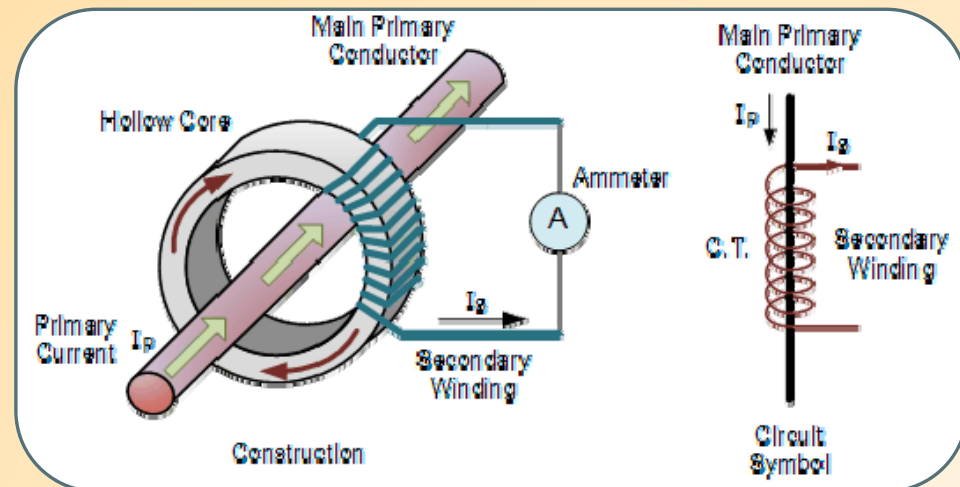
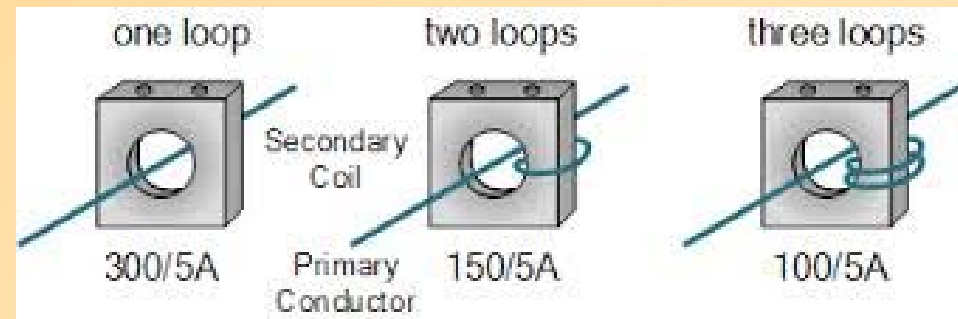
Clasificare

a. Transformatoare de măsură

Transformatoare
de curent

Transformatoare
de tensiune

Transformatoare de curent



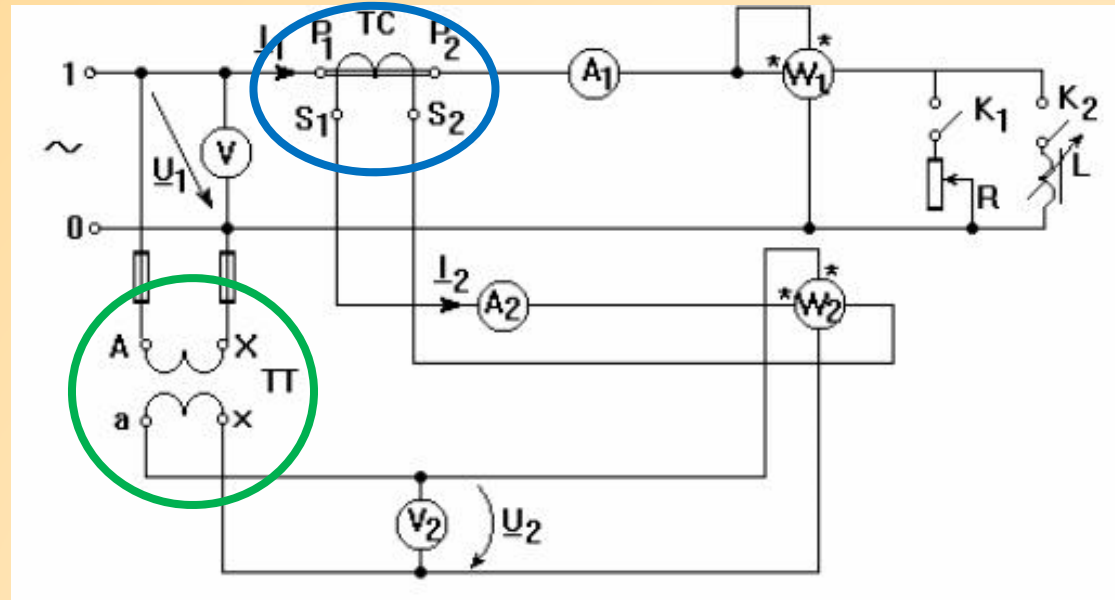
Sunt transformatoare folosite la măsurarea curenților electrici de valoare mare cu aparate obișnuite de măsură.

De regulă, conductorul prin care trece curentul ce urmează a fi măsurat reprezintă înfășurarea primară și este trecut prin interiorul miezului magnetic.

Înfășurarea secundară, care este bobinată pe miezul magnetic al transformatorului, furnizează un curent de maxim 5 A (valoare standardizată) ce este măsurat de ampermetru.

Se utilizează, de asemenea, la bobinele de curent ale wattmetrelor.

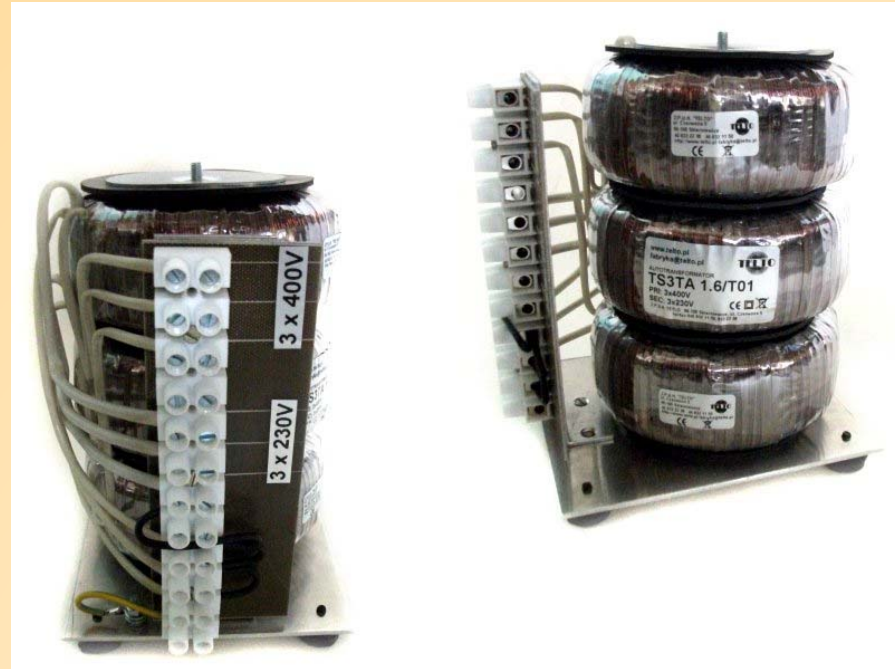
Transformatoare de tensiune



Sunt transformatoare folosite la măsurarea tensiunilor electrice de valoare mare cu aparate obișnuite de măsură, sau adaptarea tensiunii la bobinele de tensiune ale wattmetrelor.

Sunt transformatoare de mică putere folosite doar în circuitele de măsură. Tensiunea în secundar este standardizată la 100 V.

b. Autotransformatoare



Sunt transformatoare la care secundarul reprezintă o parte din circuitul primar.

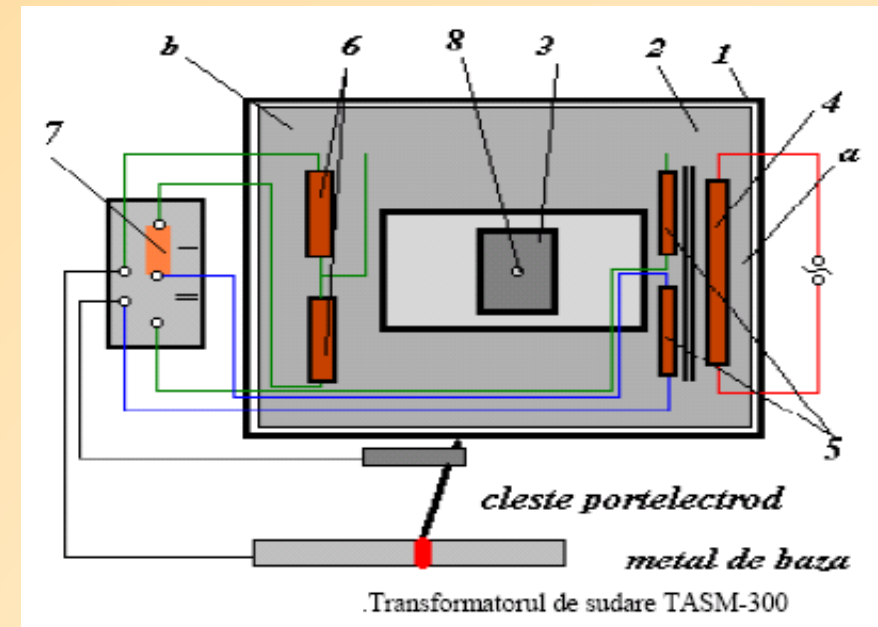
Autotransformatoarele de mică putere pot furniza o tensiune variabilă și sunt utilizate cu precădere în laboratoarele de încercări. Cel mai adesea sunt monofazate. Variația tensiunii secundare se obține prin deplasarea unui contact mobil ce determină modificarea numărului de conductoare active din înfășurarea secundară.



Autotransformatoarele de mare putere sunt utilizate pentru interconectarea unor rețele de transport al energiei electrice având tensiuni diferite.

La aceste autotransformatoare nu se face reglajul tensiunii secundare.

c. Transformatoare pentru sudura



Sunt transformatoare de construcție specială (au șunt magnetic ce poate fi deplasat) utilizate în sudura electrică.

Electrodul și piesa de sudat se conectează la bornele înfășurării secundare iar funcționarea trebuie să suporte adeseori scurtcircuitarea înfășurării secundare.

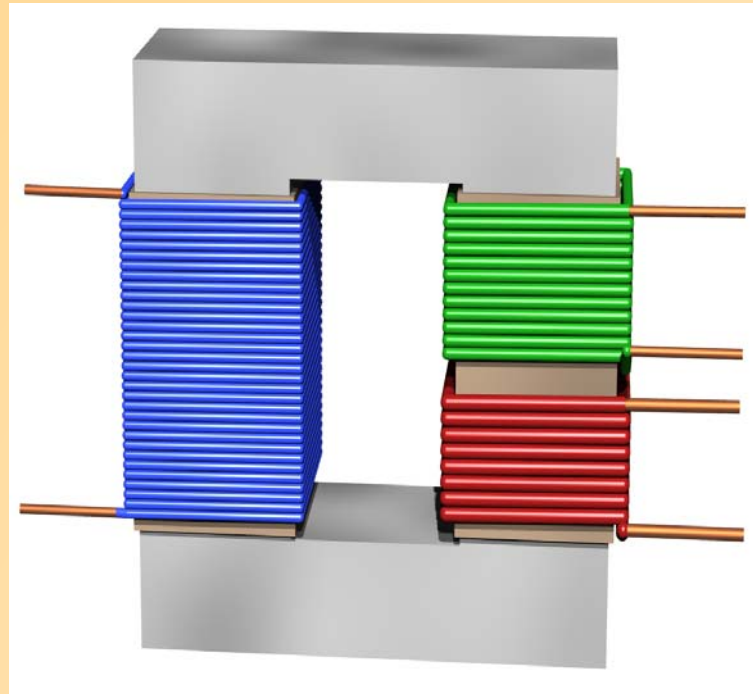
d. Transformatoare pentru schimbarea numărului de faze

Sunt transformatoare care modifică numărul de faze din secundar față de cel din primar. Condiția obligatorie este ca sistemul din secundar să fie, de asemenea, un sistem simetric.

Cele mai utilizate variante sunt:

- Transformatoare trifazat/bifazat: in secundar se obține un sistem de tensiuni defazate la 90° . Este utilizat, de exemplu, pentru alimentarea servomotoarelor bifazate.
- Transformatoare trifazat/hexafazat: in secundar se obține un sistem de tensiuni defazate la 60° . Este utilizat, de exemplu, pentru alimentarea motoarelor de c.a. (asincrone sau sincrone) hexafazate.
- Transformatoare trifazat/dodecafazat: in secundar se obține un sistem de 12 tensiuni defazate la 30° . Este utilizat, de exemplu, pentru alimentarea motoarelor de c.a. (asincrone sau sincrone) cu 12 faze.

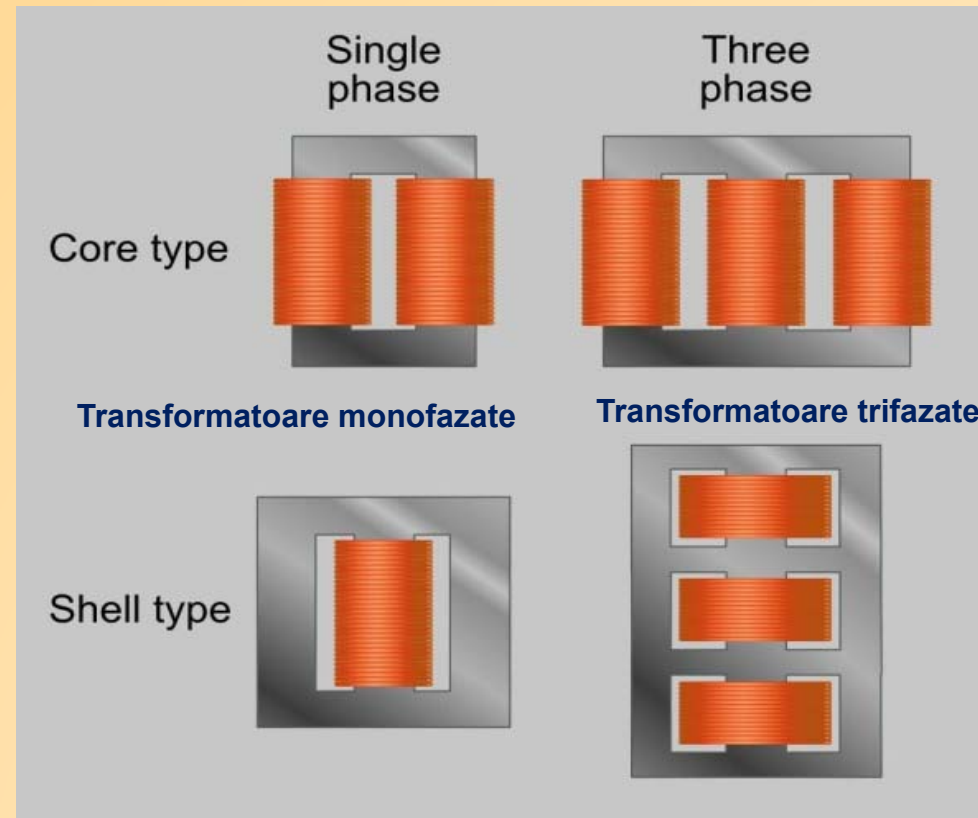
e. Transformatoare cu mai multe înfășurări secundare



Sunt transformatoare care au două sau mai multe înfășurări secundare **DISTINCTE**, cu număr diferit de spire, care furnizează tensiuni diferite pentru utilizatori diferiți.

Practic, în locul mai multor transformatoare este utilizat doar un singur transformator.

II. După numărul de faze



Clasificarea se face după numărul de faze din circuitul primar respectiv secundar, numărul de faze fiind identic.

Cele mai folosite tipuri de transformatoare sunt cele monofazate respectiv trifazate.

III. După modul de răcire

Transformatoare uscate



Transformatoare cu ulei



In cazul transformatoarelor uscate, răcirea se face cu aer in timp ce, la transformatoarele cu ulei, agentul de răcire este uleiul de transformator, ce este un ulei mineral, electroizolant cu caracteristici specifice.



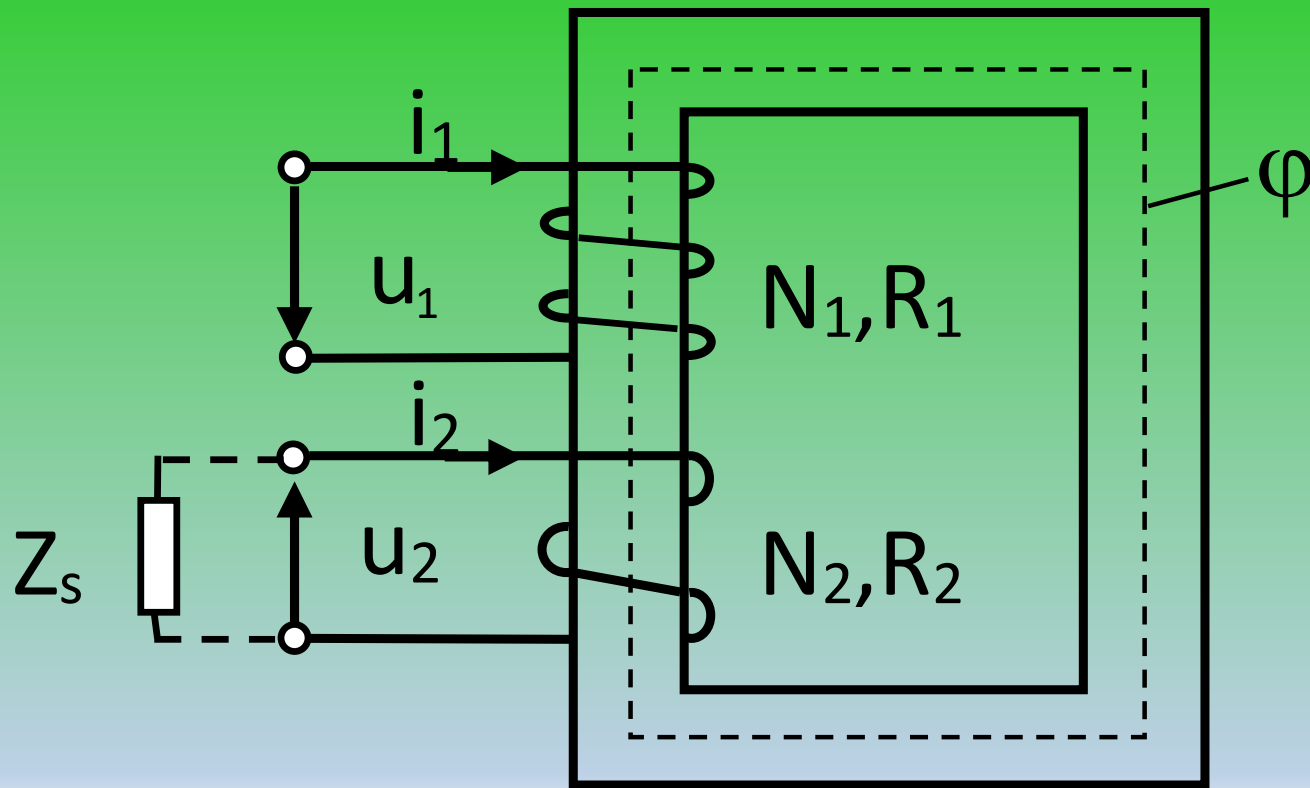
Film demonstrativ – construcția transformatorului electric

Curs 9

Principiul și ecuațiile de
funcționare ale transformatorului
electric



Principiul de funcționare a transformatorului ideal



Se consideră un miez feromagnetic pe care sunt plasate două înfășurări corespunzătoare unui transformator monofazat:

- o înfășurare primară, caracterizată de numărul de spire N_1 și rezistența R_1 , care este conectată la o sursă de alimentare alternativă de tensiune u_1 . Înfășurarea primară este parcursă de curentul i_1 .
- o înfășurare secundară, caracterizată de numărul de spire N_2 și rezistența R_2 . La bornele înfășurării secundare poate fi conectată o sarcină reprezentată de impedanța Z_s .

1. Prin alimentarea înfășurării primare de la sursa de tensiune ALTERNATIVA, se va stabili un curent alternativ i_1 care creează un câmp magnetic variabil. Liniile de câmp, în marea lor majoritate, se vor închide prin circuitul miezului magnetic alcătuind *fluxul util* al transformatorului. Prin traseul de închidere, acest flux înlănțuie atât înfășurarea secundară cât și înfășurarea primară.

Se definește fluxul fascicular ϕ ca fiind fluxul magnetic ce înlănțuie o singură spirală. Expresia lui este:

$$\phi = \Phi_m \sin \omega t \quad \text{unde} \quad \Phi_m = B_c \cdot S_c \quad \text{iar: } B_c - \text{inducția în miez,} \\ S_c - \text{secțiunea miezului}$$

2. Conform legii inducției electromagnetice (flux variabil în proximitatea unei înfășurări imobile), în ambele înfășurări se vor induce tensiuni a căror expresie este:

$$e_1 = -N_1 \frac{d\varphi}{dt} = -N_1 \frac{d(\Phi_m \sin \omega t)}{dt} = -N_1 \cdot \omega \cdot \Phi_m \cos \omega t = N_1 \cdot \omega \cdot \Phi_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

$$e_2 = -N_2 \frac{d\varphi}{dt} = N_2 \cdot \omega \cdot \Phi_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

Valorile maxime sunt:

$$E_{1max} = N_1 \cdot \omega \cdot \Phi_m$$

$$E_{2max} = N_2 \cdot \omega \cdot \Phi_m$$

iar valorile efective:

$$E_1 = \frac{E_{1max}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N_1 \cdot \Phi_m = 4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \Phi_m$$

$$E_2 = 4,44 \cdot f \cdot N_2 \cdot \Phi_m$$

3. Dacă, în aceste condiții, se conectează o sarcină la bornele înfășurării secundare, atunci se stabilește un curent i_2 respectiv apare un al doilea flux, („flux de reacție”). Cele două fluxuri create de curenții i_1 și i_2 se compun și dau naștere fluxului rezultat.

Acest lucru poate fi exprimat prin intermediul solenațiilor:

$$\theta_m = \theta_1 + \theta_2 = N_1 \cdot i_1 + N_2 \cdot i_2 = N_1 \cdot i_0$$

Egalitatea solenațiilor pune în evidență faptul că fluxul magnetic rămâne constant indiferent dacă transformatorul funcționează în sarcină (adică există fluxurile create de ambele înfășurări) sau la gol (când există doar fluxul creat de înfășurarea primară). Acest lucru este posibil întrucât, la funcționarea în sarcină, fluxurile create de cele două înfășurări au un caracter *antagonist*.

Ecuatiile celor două circuite, primar și secundar, folosind teorema a II-a a lui Kirchhoff), sunt:

$$\begin{cases} R_1 i_1 - u_1 = e_1 \\ R_2 i_2 + u_2 = e_2 \end{cases}$$

La funcționarea în gol ($i_2=0$), curentul i_1 are o valoare mica astfel încât putem neglija termenul $R_1 \cdot i_1$ și rezulta:

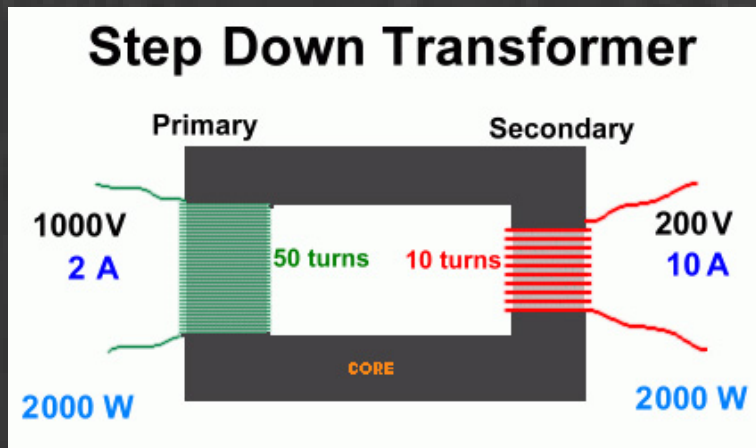
$$\begin{cases} u_1 = -e_1 \\ u_{20} = e_2 \end{cases}$$

Se definește *raportul de transformare* al transformatorului cu expresiile:

$$K = \frac{U_{1N}}{U_{20}} \cong \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

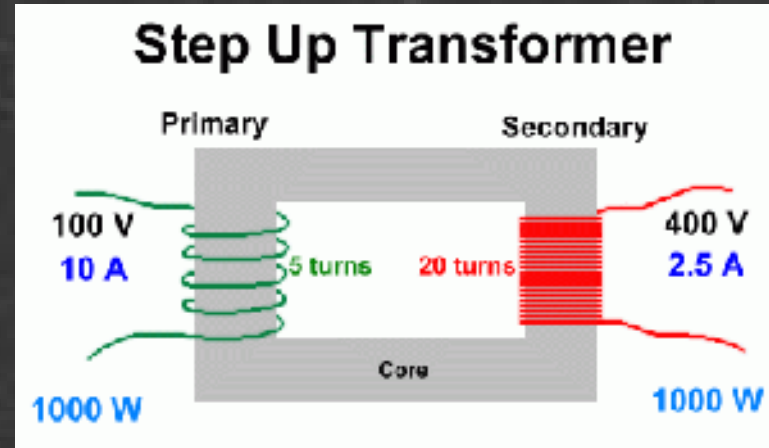
$$K > 1$$

Transformator coborâtor de tensiune

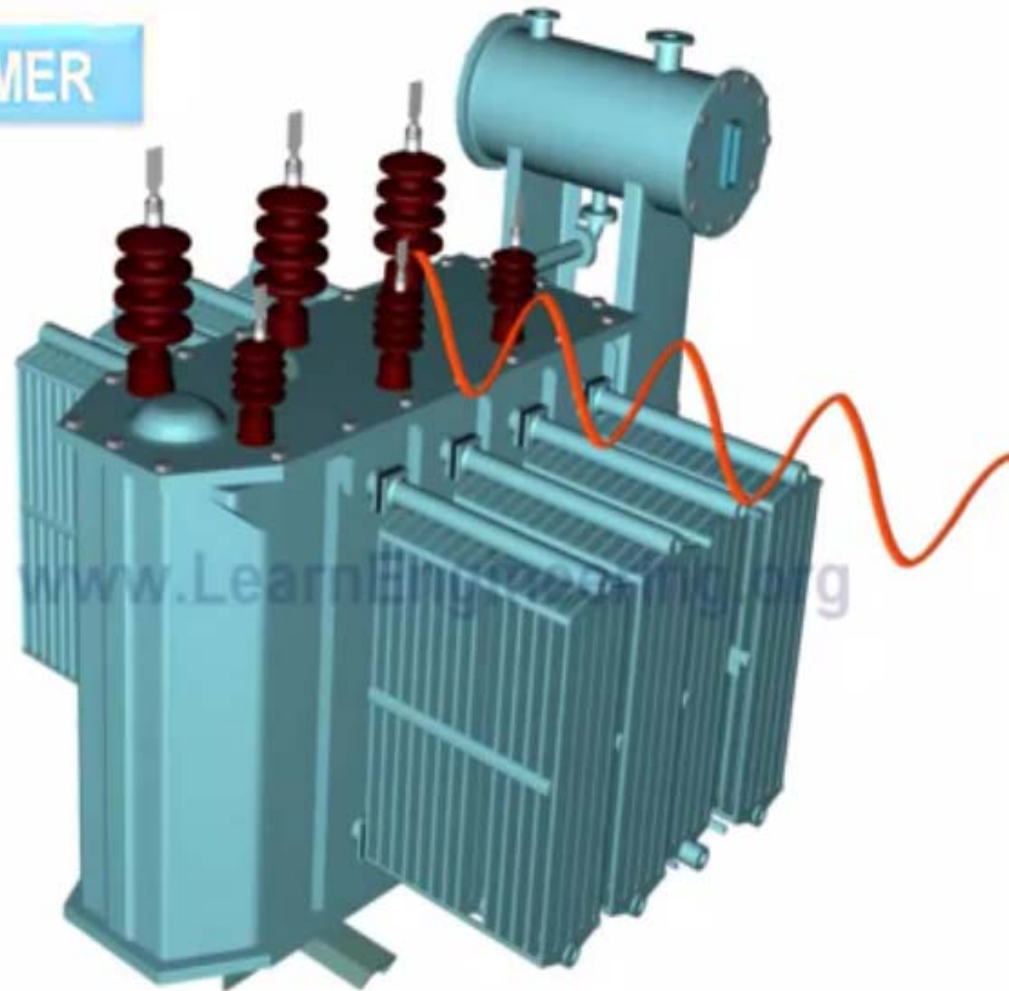


$$K < 1$$

Transformator ridicător de tensiune



TRANSFORMER

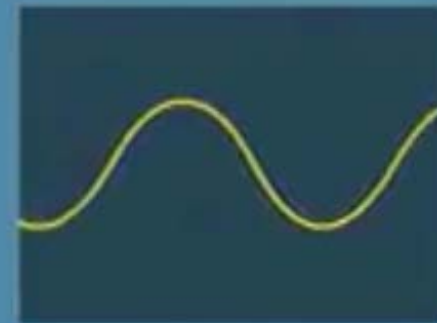
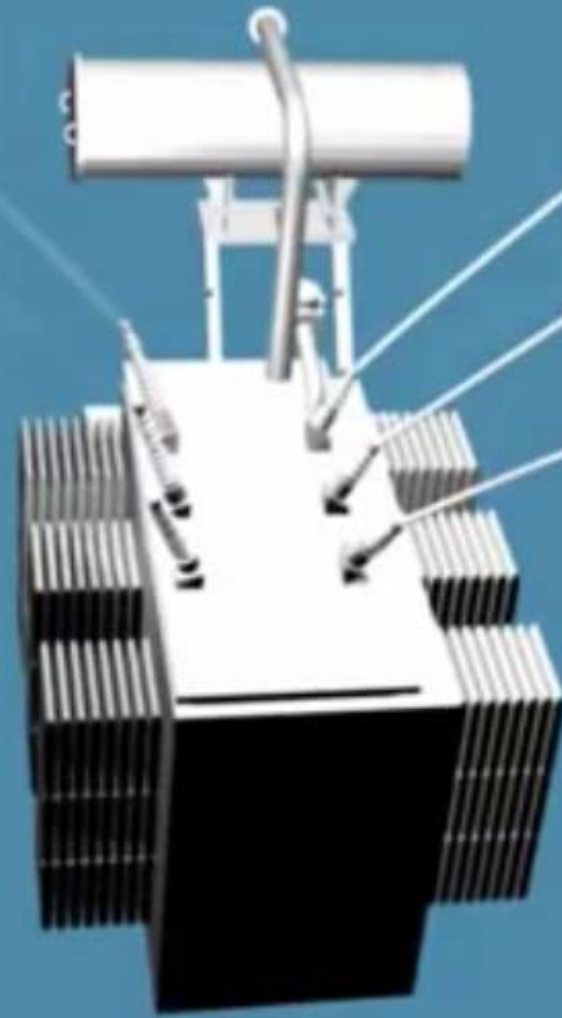


Film demonstrativ – construcția și principiul de funcționare a transformatorului

Transformer

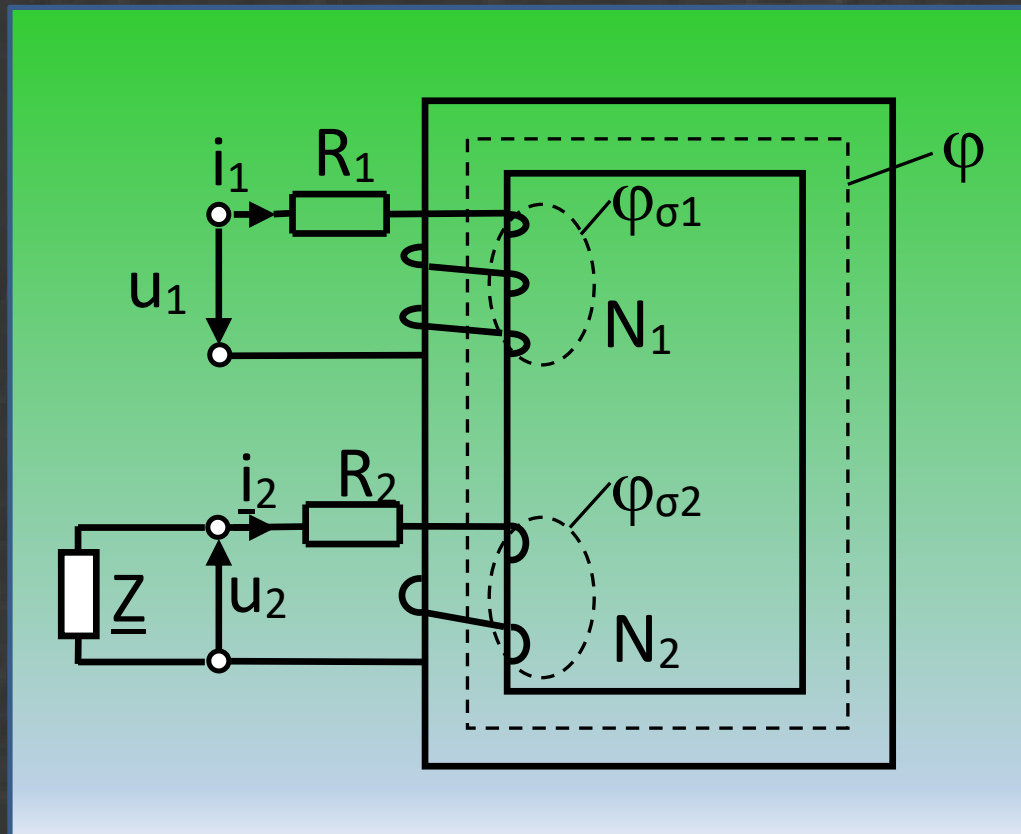
EXTERNAL FEATURES

TRANSPOWER



Film demonstrativ – principiul de funcționare a transformatorului

Ecuatiile de funcționare ale transformatorului monofazat ideal



Se consideră un transformator monofazat având cele două înfășurări, primară și secundară, cu câte N_1 respectiv N_2 spire. Rezistențele R_1 și R_2 reprezintă rezistențele înfășurărilor. Primarul este alimentat de la sursa de tensiune u_1 iar secundarul este conectat pe impedanța de sarcină Z . Curenții prin cele două înfășurări creează două câmpuri care se compun și formează câmpul rezultat. Fluxul util φ se închide prin miezul magnetic al transformatorului. În afara acestuia, există și fluxuri de dispersie, notate pe figură cu $\varphi_{\sigma 1}$ respectiv $\varphi_{\sigma 2}$, ale căror linii de câmp se închid prin aer în proximitatea fiecărei bobine. Fluxurile totale create de cele două înfășurări se pot scrie sub forma:

$$\Psi_1 = \Psi_{u1} + \Psi_{\sigma 1} = N_1 \cdot \varphi + L_{\sigma 1} \cdot i_1$$

$$\Psi_2 = \Psi_{u2} + \Psi_{\sigma 2} = N_2 \cdot \varphi + L_{\sigma 2} \cdot i_2$$

unde L_{σ} reprezintă inductanța de dispersie.

Ecuatiile celor două circuite, primar și secundar, folosind teorema a II-a a lui Kirchhoff), sunt:

$$\begin{cases} u_1 + e_1 = R_1 i_1 \\ u_2 + R_2 i_2 = e_2 \end{cases} \quad \text{sau} \quad \begin{cases} u_1 - R_1 i_1 = -e_1 \\ u_2 + R_2 i_2 = e_2 \end{cases}$$

Conform legii inducției electromagnetice, expresia tensiunilor induse este:

$$e_1 = -\frac{d\Psi_1}{dt} \quad e_2 = -\frac{d\Psi_2}{dt}$$

Sistemul de ecuații se poate rescrie sub forma:

$$\begin{cases} u_1 - R_1 i_1 = N_1 \frac{d\varphi}{dt} + L_{\sigma 1} \cdot \frac{di_1}{dt} \\ u_2 + R_2 i_2 = -N_2 \frac{d\varphi}{dt} - L_{\sigma 2} \cdot \frac{di_2}{dt} \end{cases}$$

sau

$$\begin{cases} u_1 = R_1 i_1 + N_1 \frac{d\varphi}{dt} + L_{\sigma 1} \cdot \frac{di_1}{dt} \\ -u_2 = R_2 i_2 + N_2 \frac{d\varphi}{dt} + L_{\sigma 2} \cdot \frac{di_2}{dt} \end{cases}$$

Avem două ecuații și patru necunoscute: i_1 , i_2 , u_2 și φ

Adăugăm ecuația circuitului de sarcină:

$$u_2 = Ri_2 + L \cdot \frac{di_2}{dt} + \frac{1}{C} \int i_2 dt$$

unde R, L, și C caracterizează
impedanța de sarcină, Z.

și ecuația circuitului magnetic

$$N_1 \cdot i_1 + N_2 \cdot i_2 = N_1 \cdot i_0$$

(egalitate solenațiilor la funcționarea
în sarcină respectiv la gol)

Sistemul complet de ecuații în mărimi instantanee este:

$$\begin{cases} u_1 = R_1 i_1 + L_{\sigma 1} \cdot \frac{di_1}{dt} + N_1 \frac{d\varphi}{dt} \\ -u_2 = R_2 i_2 + L_{\sigma 2} \cdot \frac{di_2}{dt} + N_2 \frac{d\varphi}{dt} \\ u_2 = Ri_2 + L \cdot \frac{di_2}{dt} + \frac{1}{C} \int i_2 dt \\ N_1 \cdot i_1 + N_2 \cdot i_2 = N_1 \cdot i_0 \end{cases}$$

Pentru ușurința scrierii ecuațiilor în mărimi instantanee, se poate trece la scrierea în complex simplificat. Astfel, orice mărime alternativă poate fi scrisă și sub forma:

$$i = \sqrt{2}I \sin(\omega t + \varphi) \leftrightarrow \underline{I} = I \cdot e^{j\omega t}$$

respectiv, derivata și integrala, sub forma: $\frac{di}{dt} \leftrightarrow j\omega \underline{I}$; $\int i \cdot dt \leftrightarrow \frac{1}{j\omega} \underline{I}$

Sistemul complet de ecuații în mărimi complexe este:

$$\left\{ \begin{array}{l} \underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + L_{\sigma 1} \cdot j\omega \cdot \underline{I}_1 + N_1 \cdot j\omega \cdot \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}} \\ -\underline{U}_2 = R_2 \underline{I}_2 + L_{\sigma 2} \cdot j\omega \cdot \underline{I}_2 + N_2 \cdot j\omega \cdot \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}} \\ \underline{U}_2 = R \underline{I}_2 + j\omega L \cdot \underline{I}_2 + \frac{1}{j\omega C} \underline{I}_2 \\ N_1 \cdot \underline{I}_1 + N_2 \cdot \underline{I}_2 = N_1 \cdot \underline{I}_0 \end{array} \right.$$

Ultimii termeni din primele două ecuații ale sistemului reprezintă tensiunile induse în înfășurări de către fluxul util:

$$N_1 \cdot j\omega \cdot \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}} = -\underline{E_1} \quad \text{și} \quad N_2 \cdot j\omega \cdot \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}} = -\underline{E_2}$$

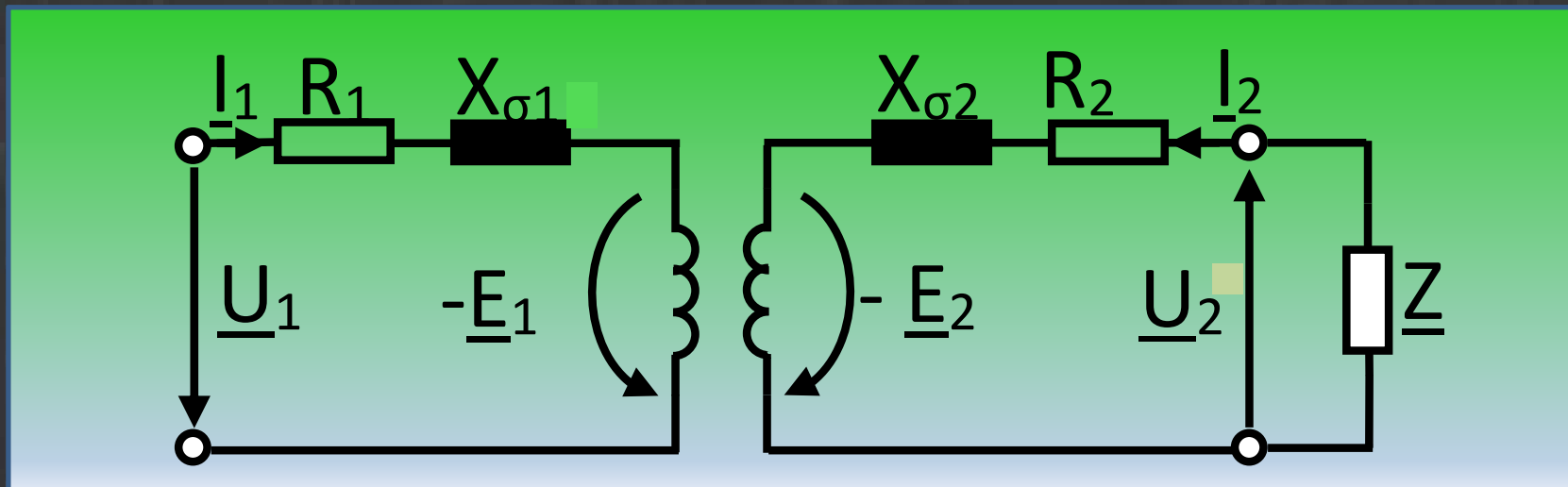
iar termenii de tipul $(\omega \cdot L)$ reprezintă reactanțe. Prin urmare, se definesc reactanțele de scăpări pe fază:

$$\omega L_{\sigma 1} = X_{\sigma 1} \quad \text{și} \quad \omega L_{\sigma 2} = X_{\sigma 2}$$

Sistemul de ecuații ce caracterizează funcționarea în sarcină a transformatorului *ideal* se poate scrie astfel:

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jX_{\sigma 1} \cdot \underline{I}_1 - \underline{E}_1 \\ -\underline{U}_2 = R_2 \underline{I}_2 + jX_{\sigma 2} \cdot \underline{I}_2 - \underline{E}_2 \\ \underline{U}_2 = R \underline{I}_2 + jX \cdot \underline{I}_2 \\ N_1 \cdot \underline{I}_1 + N_2 \cdot \underline{I}_2 = N_1 \cdot \underline{I}_0 \end{cases}$$

Schema electrică echivalentă descrisă de sistemul de ecuații este:



Ecuatiile transformatorului ideal cu mărimile secundarului raportate la primar (transformatorul raportat)

Transformatorul cu mărimi raportate – este un transformator echivalent cu cel real dar care are același număr de conductoare (N) atât în primar cât și în secundar.

$$N_1 = N_2 = N'_2$$

Condiții de echivalența

Pentru ca transformatorul raportat să fie echivalent cu cel real, trebuie îndeplinite patru condiții, după cum urmează (mărimile obținute prin procedeul de raportare sunt notate cu „prim”):

1. Solenația raportată să fie egală cu cea reală

$$N'_2 \cdot I'_2 = N_2 \cdot I_2$$

$$I'_2 = \frac{N_2}{N_1} \cdot I_2 = \frac{1}{K} \cdot I_2$$

unde K este coeficientul de transformare

2. Pierderile de putere activă in transformatorul real și in cel raportat să fie aceleași

$$R'_2 \cdot I_2'^2 = R_2 \cdot I_2^2$$

$$R'_2 = R_2 \cdot \frac{I_2^2}{I_2'^2} = K^2 \cdot R_2$$

3. Pierderile de putere reactivă datorate fluxului de scăpări să fie aceleași in cele doua transformatoare

$$X'_{\sigma 2} \cdot I_2'^2 = X_{\sigma 2} \cdot I_2^2$$

$$X'_{\sigma 2} = X_{\sigma 2} \cdot \frac{I_2^2}{I_2'^2} = K^2 \cdot X_{\sigma 2}$$

4. Puterea aparentă a circuitului raportat să fie egală cu cea a circuitului real

$$U'_2 \cdot I'_2 = U_2 \cdot I_2$$

$$U'_2 = U_2 \cdot \frac{I_2}{I'_2} = K \cdot U_2$$

In plus puterile electromagnetice trebuie să fie egale, adică:

$$E'_2 \cdot I'_2 = E_2 \cdot I_2$$

$$E'_2 = K \cdot E_2$$

dar

$$E_1 = 4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \Phi_m$$

$$E'_2 = 4,44 \cdot f \cdot N'_2 \cdot \Phi_m$$

de unde rezultă:

$$E_1 = E'_2$$

Înmulțim ecuațiile 2 și 3 din sistemul de ecuații cu N_1/N_2 și grupăm termenii convenabil:

$$-\underline{U}_2 = R_2 \underline{I}_2 + jX_{\sigma 2} \cdot \underline{I}_2 - \underline{E}_2 \left| \frac{N_1}{N_2} \right.$$

$$\underline{U}_2 = R \underline{I}_2 + jX \cdot \underline{I}_2 \left| \frac{N_1}{N_2} \right.$$

$$-\underline{U}_2 \cdot \left(\frac{N_1}{N_2} \right) = R_2 \cdot \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \cdot \underline{I}_2 \cdot \left(\frac{N_2}{N_1} \right) + jX_{\sigma 2} \cdot \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \cdot \underline{I}_2 \cdot \left(\frac{N_2}{N_1} \right) - \underline{E}_2 \cdot \left(\frac{N_1}{N_2} \right)$$

$$\underline{U}_2 \cdot \left(\frac{N_1}{N_2} \right) = R \cdot \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \cdot \underline{I}_2 \cdot \left(\frac{N_2}{N_1} \right) + jX \cdot \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \cdot \underline{I}_2 \cdot \left(\frac{N_2}{N_1} \right)$$

Se obține în final:

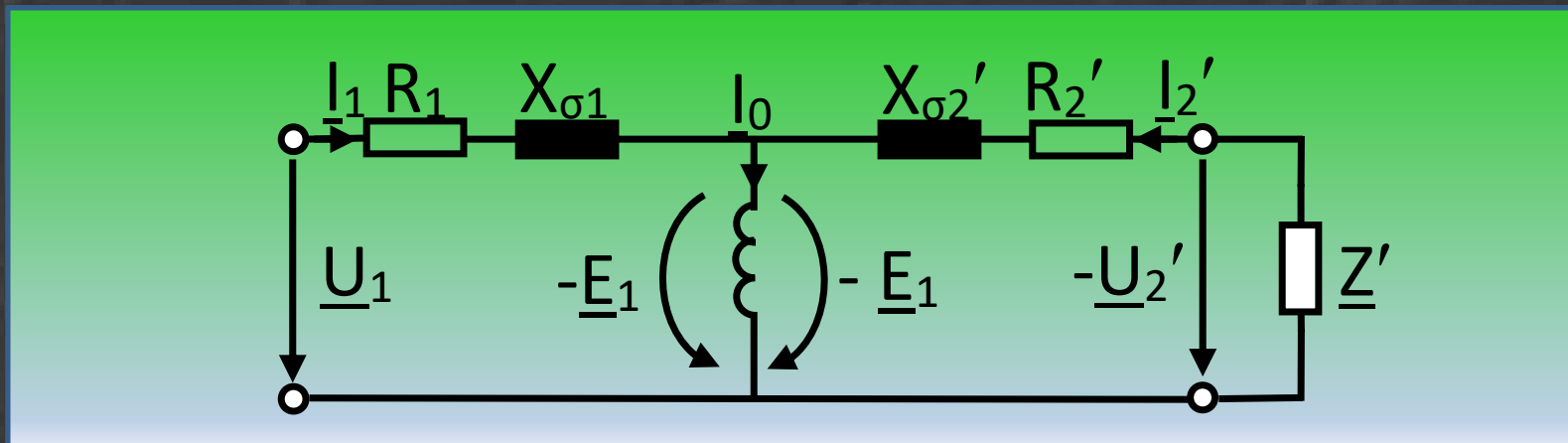
$$-\underline{U}'_2 = R'_2 \cdot \underline{I}'_2 + jX'_{\sigma 2} \cdot \underline{I}'_2 - \underline{E}_1$$

$$\underline{U}'_2 = R' \cdot \underline{I}'_2 + jX' \cdot \underline{I}'_2$$

Sistemul de ecuații ce caracterizează funcționarea în sarcină a transformatorului *raportat* se poate scrie astfel:

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jX_{\sigma 1} \cdot \underline{I}_1 - \underline{E}_1 \\ -\underline{U}'_2 = R'_2 \cdot \underline{I}'_2 + jX'_{\sigma 2} \cdot \underline{I}'_2 - \underline{E}_1 \\ \underline{U}'_2 = R' \cdot \underline{I}'_2 + jX' \cdot \underline{I}'_2 \\ N_1 \cdot \underline{I}_1 + N'_2 \cdot \underline{I}'_2 = N_1 \cdot \underline{I}_0 \Leftrightarrow \underline{I}_1 + \underline{I}'_2 = \underline{I}_0 \end{cases}$$

iar schema electrică echivalentă descrisă de sistemul de ecuații este:



Se remarcă dispariția cuplajului mutual dintre circuitele primar și secundar.

Ecuatiile transformatorului când sunt luate in considerare pierderile in fier (*transformatorul real*)

Studiul funcționării transformatorului *ideal* și *raportat* NU ia în considerație pierderile in miezul feromagnetic.

$$p_{Fe} = p_H + p_F$$

Acestea se manifestă printre altele, prin încălzirea transformatorului. Fenomenul este similar celui care se petrece atunci când un material conductor este parcurs de curent electric și când, datorită pierderilor Joule, are loc încălzirea conductorului.

Pentru a modela fenomenul de încălzire datorat pierderilor in miezul magnetic, se poate accepta existența unei „rezistențe” parcursă de o componentă activă a curentului de magnetizare (curentul ce parcurge înfășurarea de pe latura verticală din schema echivalentă a transformatorului raportat)

Prin urmare, in circuitul electric apar două elemente conectate in paralel:

- Inductanța L_m (sau reactanța X_m) care este parcursă de curentul I_{0r} ce reprezintă curentul ce magnetizează circuitul magnetic al transformatorului (este o componentă reactivă);
- Rezistența R_m ce este parcursă de curentul I_{0a} și este responsabilă de pierderile in miezul magnetic

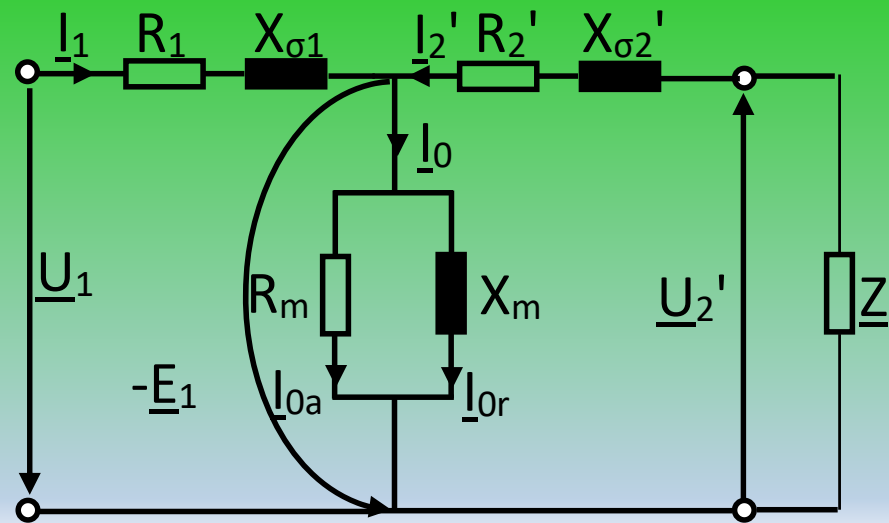
Expresia curentului I_0 devine:

$$\underline{I_0} = \underline{I_{0r}} + \underline{I_{0a}} = \underline{I_1} + \underline{I_2'}$$

Sistemul de ecuații ce caracterizează funcționarea în sarcină a transformatorului *real* se poate scrie astfel:

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jX_{\sigma 1} \cdot \underline{I}_1 - \underline{E}_1 \\ -\underline{U}'_2 = R'_2 \cdot \underline{I}'_2 + jX'_{\sigma 2} \cdot \underline{I}'_2 - \underline{E}_1 \\ \underline{U}'_2 = R' \cdot \underline{I}'_2 + jX' \cdot \underline{I}'_2 \\ \underline{I}_1 + \underline{I}'_2 = \underline{I}_0 = \underline{I}_{0a} + \underline{I}_{0r} \end{cases}$$

iar schema electrică echivalentă descrisă de sistemul de ecuații este:



Pentru determinarea expresiei rezistenței R_m (denumită rezistență de magnetizare) se scrie expresia pierderile in fier:

$$p_{Fe} = R_m \cdot I_{0a}^2 = R_m \cdot \left(\frac{E_1}{R_m} \right)^2$$

de unde, rezistența de magnetizare este:

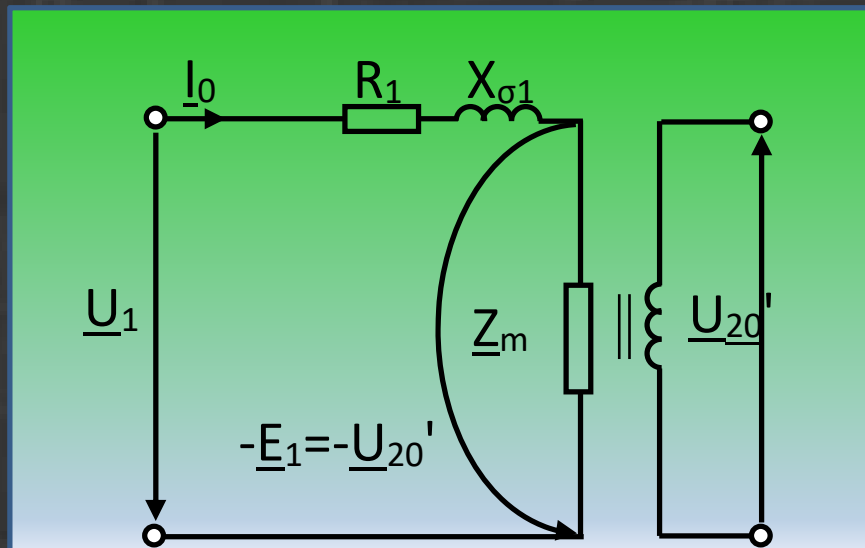
$$R_m = \frac{E_1^2}{p_{Fe}}$$

Funcționarea și încercarea la gol a transformatorului monofazat

Regimul de funcționare la gol se realizează atunci când la bornele înfășurării secundare NU este conectată nici o sarcină. Altfel spus:

$$\underline{I}'_2 = 0 \quad \underline{I}_1 \text{ devine } \underline{I}_0 \quad \underline{U}'_2 \text{ devine } \underline{U}'_{20}$$

Schema echivalentă și sistemul de ecuații devin:



$$\begin{cases} \underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_0 + jX_{\sigma 1} \cdot \underline{I}_0 - \underline{E}_1 \\ -\underline{U}'_{20} = -\underline{E}_1 \\ \underline{I}_1 = \underline{I}_0 = \underline{I}_{0a} + \underline{I}_{0r} \end{cases}$$

In continuare se poate scrie:

$$R_1 + jX_{\sigma 1} = \underline{Z_1}$$

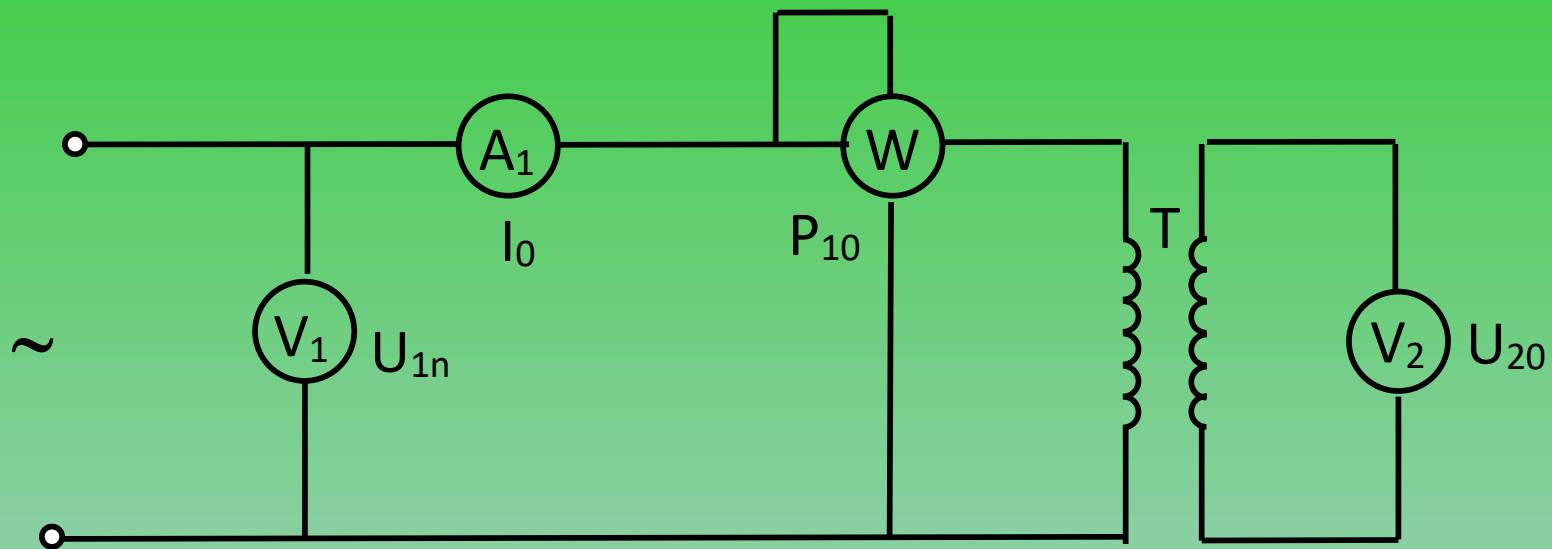
iar din schema echivalentă se poate deduce ușor:

$$-\underline{E_1} = \underline{Z_m} \cdot \underline{I_0}$$

Introducând aceste două relații in prima ecuație a sistemului, se obține:

$$\underline{U_1} = \underline{Z_1} \underline{I_0} + \underline{Z_m} \cdot \underline{I_0}$$

In ceea ce privește componentele curentului I_0 (ce este curentul de mers in gol care se stabilește prin înfășurarea primară), componenta reactivă, I_{0r} este predominantă (reprezintă circa 80% din curentul de mers in gol) si realizează magnetizarea circuitului magnetic, iar componenta activă doar 20% din I_0 .



Montajul pentru încercarea la gol a transformatorului monofazat, ce conține aparatele de măsură indicate pe figură, se conectează la o sursă de tensiune având valoarea nominală corespunzătoare înfășurării primare.

Încercarea de mers la gol are drept scop determinarea următoarelor mărimi caracteristice transformatorului:

1. Determinarea raportului de transformare

$$K = \frac{U_{1N}}{U_{20}}$$

2. Determinarea pierderilor in fier

Puterea activă absorbită, ce este măsurată cu wattmetrul, este utilizată pentru acoperirea pierderilor pe rezistențele R_1 și R_m :

$$P_{10} = (R_1 + R_m) \cdot \underline{I_0}^2$$

Întrucât: $R_1 \ll R_m$ rezultă că putere absorbită reprezintă pierderile pe rezistența R_m , adică pierderile in fier.

$$P_{10} = R_m \cdot I_0^2 = p_{Fe}$$



Încercarea la gol a transformatorului este modalitatea prin care pot fi determinate experimental *pierderile in fier*.

3. Determinarea impedanței, rezistenței și reactanței de magnetizare

$$Z_m = \frac{E_1}{I_0} = \frac{E'_2}{I_0} = \frac{U'_{20}}{I_0} = K \cdot \frac{U_{20}}{I_0}$$

$$R_m = \frac{P_{10}}{I_0^2} \quad X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2}$$

4. Determinarea factorului de putere la mersul in gol

$$P_{10} = U_{10} \cdot I_0 \cdot \cos \varphi_0$$

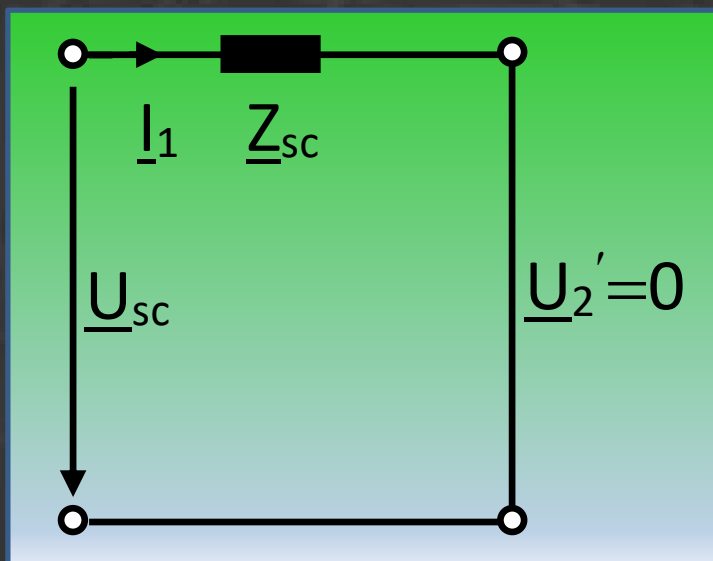
$$\cos \varphi_0 = \frac{P_{10}}{U_{10} \cdot I_0}$$

Funcționarea și încercarea la scurtcircuit a transformatorului monofazat

Acest regim se realizează atunci când bornele înfășurării secundare sunt scurtcircuitate. Altfel spus, impedanța de sarcină și tensiunea la borne sunt nule.

$$\underline{U}'_2 = 0 \quad \underline{Z}' = 0$$

Schema echivalentă și sistemul de ecuații devin:



$$\begin{cases} \underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jX_{\sigma 1} \cdot \underline{I}_1 - \underline{E}_1 \\ 0 = R'_2 \cdot \underline{I}'_2 + jX'_{\sigma 2} \cdot \underline{I}'_2 - \underline{E}_1 \\ \underline{I}_1 + \underline{I}'_2 = \underline{I}_0 \end{cases}$$

Întrucât curentul de mers in gol, I_0 reprezintă până la 3% din curentul nominal, I_n , acesta se poate neglija iar ecuația a treia a sistemului devine:

$$\underline{I_1} = -\underline{I'_2}$$

Înlocuind in ecuația a doua și adunând apoi cu prima ecuație, se obține:

$$\underline{U_1} = (R_1 + R'_2)\underline{I_1} + j(X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2}) \cdot \underline{I_1}$$

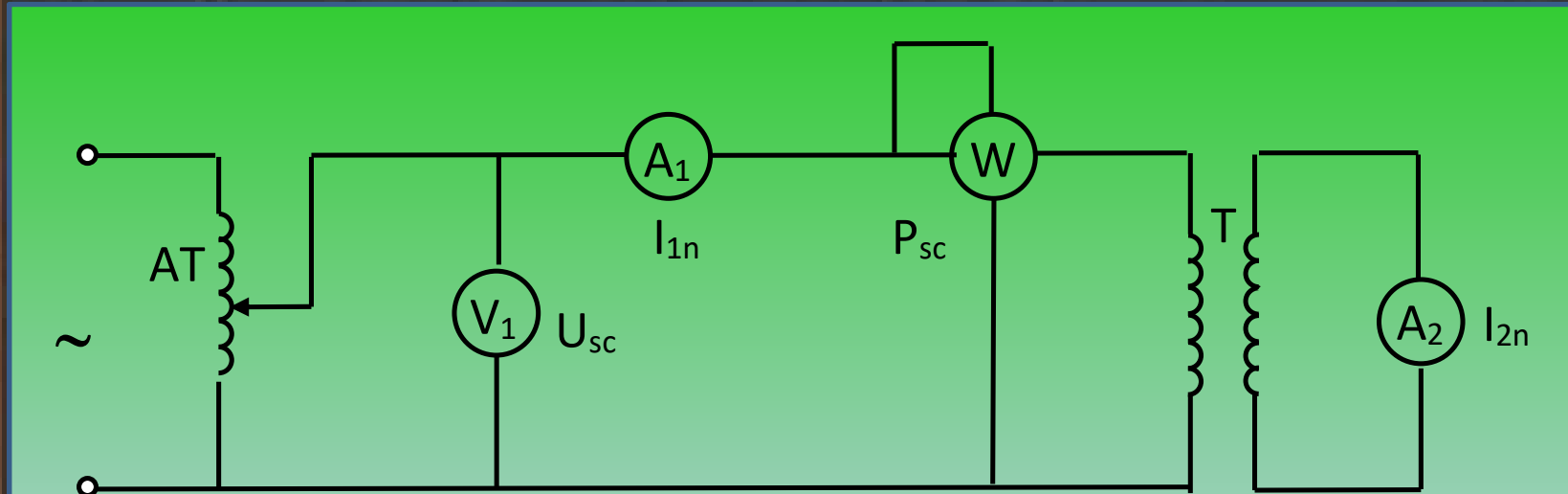
sau:

$$\underline{U_1} = R_{sc}\underline{I_1} + jX_{sc} \cdot \underline{I_1}$$

respectiv:

$$\underline{U_{sc}} = \underline{Z_{sc}} \cdot \underline{I_1}$$

Regimul de scurtcircuit este un regim de *avarie*



Montaj pentru încercarea la scurtcircuit de proba a transformatorului monofazat

Se alimentează transformatorul cu *tensiune redusă* până se obțin curenții nominali prin cele două înfășurări.

Încercarea la scurtcircuit are drept scop determinarea următoarelor mărimi caracteristice transformatorului:

1. Determinarea pierderilor în înfășurări

$$P_{sc} = R_{sc} \cdot I_1^2 = R_1 \cdot I_1^2 + R'_2 \cdot I_1^2 = R_1 \cdot I_1^2 + R'_2 \cdot I_2'^2 = p_{j1} + p_{j2}$$

Puterea măsurată de wattmetru reprezintă *doar* puterea necesară acoperirii pierderilor în înfășurări (se consideră că pierderile în fier care sunt proporționale cu pătratul tensiunii de alimentare pot fi neglijate întrucât tensiunea este foarte redusă).

2. Determinarea factorului de putere la scurtcircuit

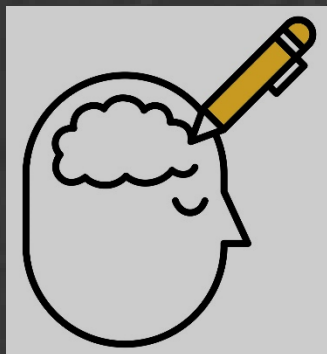
$$P_{sc} = U_{sc} \cdot I_{1N} \cdot \cos \varphi_{sc}$$

$$\cos \varphi_{sc} = \frac{P_{sc}}{U_{sc} \cdot I_{1n}}$$

3. Determinarea impedanței, reactanței și rezistenței de scurtcircuit

$$Z_{sc} = \frac{U_{1sc}}{I_{1n}} \quad R_{sc} = Z_{sc} \cdot \cos \varphi_{sc}$$

$$X_{sc} = \sqrt{Z_{sc}^2 - R_{sc}^2} = Z_{sc} \cdot \sin \varphi_{sc}$$



Pierderile în transformatorul electric pot fi determinate prin două încercări simple: încercarea la gol și încercarea la scurtcircuit. Astfel, se poate calcula randamentul fără a fi necesară o încercare în sarcină (este vorba despre randamentul corespunzător punctului de funcționare nominală).

Curs 10

Bilanțul puterilor transformatorului monofazat



Pentru determinarea echilibrului puterilor in transformatorul electric, se pornește de la sistemul de ecuații a transformatorului real:

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jX_{\sigma 1} \cdot \underline{I}_1 - \underline{E}_1 \\ -\underline{U}'_2 = R'_2 \cdot \underline{I}'_2 + jX'_{\sigma 2} \cdot \underline{I}'_2 - \underline{E}_1 \\ \underline{U}'_2 = R' \cdot \underline{I}'_2 + jX' \cdot \underline{I}'_2 \\ \underline{I}_1 + \underline{I}'_2 = \underline{I}_0 = \underline{I}_{0a} + \underline{I}_{0r} \end{cases}$$

De data aceasta, se va trece, de la scrierea in complex simplificat la forma echivalentă trigonometrică:

Reamintesc scrierea in complex simplificat si expresia conjugatei:

$$\underline{I}_1 = I_1 e^{j\alpha_1} = I_1 (\cos \alpha_1 + j \sin \alpha_1)$$

$$\underline{I}_1^* = I_1 e^{-j\alpha_1} = I_1 (\cos \alpha_1 - j \sin \alpha_1)$$

$$\underline{I}_1 \cdot \underline{I}_1^* = I_1^2$$

Amplific prima ecuație cu conjugata complexă a curentului primar:

$$\left\{ \begin{array}{l} \underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jX_{\sigma 1} \cdot \underline{I}_1 - \underline{E}_1 \quad \left| \underline{I}_1^* \right. \quad (1) \\ -\underline{U}'_2 = R'_2 \cdot \underline{I}'_2 + jX'_{\sigma 2} \cdot \underline{I}'_2 - \underline{E}_1 \quad (2) \\ \underline{I}_1 + \underline{I}'_2 = \underline{I}_0 = \underline{I}_{0a} + \underline{I}_{0r} \quad (3) \end{array} \right.$$

și scriu expresia obținută:

$$\underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^* = R_1 \underline{I}_1 \cdot \underline{I}_1^* + jX_{\sigma 1} \cdot \underline{I}_1 \cdot \underline{I}_1^* - \underline{E}_1 \cdot \underline{I}_1^*$$

Din ecuația 3 înlocuiesc pe \underline{I}_1

$$\underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^* = R_1 I_1^2 + jX_{\sigma 1} \cdot I_1^2 - \underline{E}_1 (\underline{I}_0 - \underline{I}'_2)^*$$

sau

$$\underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^* = R_1 I_1^2 + jX_{\sigma 1} \cdot I_1^2 - \underline{E}_1 \cdot \underline{I}_0^* + \underline{E}_1 \cdot \underline{I}'_2^*$$

Înlocuiesc pe I_0 cu suma celor doi curenți, componenta activă și reactivă:

$$\underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^* = R_1 I_1^2 + jX_{\sigma 1} \cdot I_1^2 - \underline{E}_1 (\underline{I}_{0a} + \underline{I}_{0r})^* + \underline{E}_1 \cdot \underline{I}'_2^*$$

Din schema echivalentă a transformatorului avem următoarea egalitate:

$$-\underline{E}_1 \left(\underline{I}_{0a} + \underline{I}_{0r} \right)^* = R_m \cdot I_{0a}^2 + jX_m \cdot I_{0r}^2$$

Prin înlocuire rezultă în ecuația 1:

$$\underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^* = R_1 I_1^2 + jX_{\sigma 1} \cdot I_1^2 + R_m \cdot I_{0a}^2 + jX_m \cdot I_{0r}^2 + \underline{E}_1 \cdot \underline{I}_2^*$$

Din ecuația 2 explicitez pe \underline{E}_1 și introduc valoarea sa în ecuația 1:

$$\underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^* = R_1 I_1^2 + jX_{\sigma 1} \cdot I_1^2 + R_m \cdot I_{0a}^2 + jX_m \cdot I_{0r}^2 + \underline{I}_2^* \left(R'_2 \cdot \underline{I}_2 + jX'_{\sigma 2} \cdot \underline{I}_2 + \underline{U}'_2 \right)$$

sau:

$$\underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^* = R_1 I_1^2 + jX_{\sigma 1} \cdot I_1^2 + R_m \cdot I_{0a}^2 + jX_m \cdot I_{0r}^2 + R'_2 \cdot \underline{I}_2'^2 + jX'_{\sigma 2} \cdot \underline{I}_2'^2 + \underline{U}'_2 \cdot \underline{I}_2'^*$$

Rearanjez convenabil termenii:

$$\underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^* = R_1 I_1^2 + R_m \cdot I_{0a}^2 + R'_2 \cdot I_2'^2 + jX_{\sigma 1} \cdot I_1^2 + jX_m \cdot I_{0r}^2 + jX'_{\sigma 2} \cdot I_2'^2 + \underline{U}'_2 \cdot \underline{I}_2'^*$$

In relația de mai sus se rescriu termenii subliniați in forma lor trigonometrică, după care se despart termenii corespunzători puterii active și reactive:

$$\begin{cases} U_1 I_1 \cos \varphi_1 = R_1 \cdot I_1^2 + R_m \cdot I_{0a}^2 + R'_2 \cdot I_2'^2 + U'_2 \cdot I_2' \cdot \cos \varphi_2 \\ U_1 I_1 \sin \varphi_1 = X_{\sigma 1} \cdot I_1^2 + X_m \cdot I_{0r}^2 + X'_{\sigma 2} \cdot I_2'^2 + U'_2 \cdot I_2' \cdot \sin \varphi_2 \end{cases}$$

Puterea activa absorbita de la rețea: $P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1$

Pierderi de putere activă in înfășurarea primară si miezul feromagnetic:

$$p_{j1} = R_1 I_1^2$$
$$p_{Fe} = R_m I_{0a}^2$$

Pierderi in înfășurarea secundară : $p_{j2} = R'_2 \cdot I'_2{}^2$

Puterea activă transmisă circuitului receptor: $P_2 = U'_2 \cdot I'_2 \cdot \cos \varphi_2$

Puterea reactivă absorbită de la rețea: $Q_1 = U_1 I_1 \sin \varphi_1$

Pierderi de putere reactivă necesare producerii câmpului de dispersie în înfășurarea primară și secundară:

$$Q_{\sigma 1} = X_{\sigma 1} \cdot I_1^2$$
$$Q_{\sigma 2} = X'_{\sigma 2} \cdot I_2'^2$$

Pierderi de putere reactivă necesare magnetizării circuitului magnetic:

$$Q_m = X_m \cdot I_{0r}^2$$

Puterea reactivă transmisă circuitului receptor: $Q_2 = U_2' \cdot I_2' \cdot \sin \varphi_2$

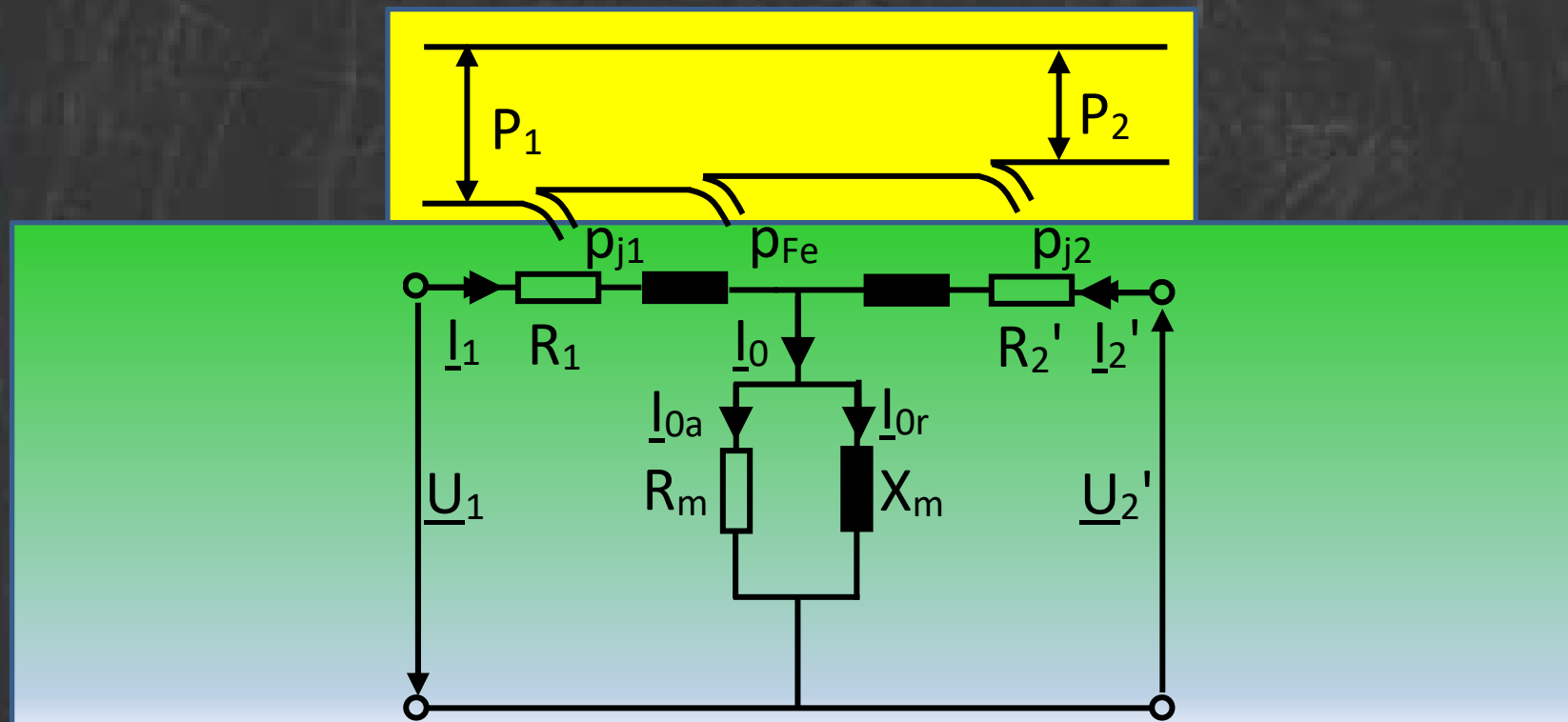
Echilibrul puterilor active și reactive poate fi scris sub formă concisă:

$$S_1 = P_1 + jQ_1$$

$$S_2 = P_2 + jQ_2$$

$$P_1 = p_{j1} + p_{Fe} + p_{j2} + P_2$$

$$Q_1 = Q_{\sigma 1} + Q_m + Q_{\sigma 2} + Q_2$$



Caracteristica randamentului transformatorului monofazat

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2' \cdot I_2' \cdot \cos \varphi_2}{U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1}$$

Sau, luând in considerare pierderile :

$$\eta = \frac{U_2' \cdot I_2' \cdot \cos \varphi_2}{U_2' \cdot I_2' \cdot \cos \varphi_2 + p_j + p_{Fe}}$$

Caracteristica randamentului reprezintă variația $\eta = f(P_2)$ pentru $U_1 = \text{const.}$ și $\cos \varphi_2 = \text{const.}$

Deoarece transformatorul nu funcționează permanent la sarcină nominală, se definește coeficientul de sarcină:

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2N}} = \frac{I'_2}{I'_{2N}} \cong \frac{I_1}{I_{1N}}$$

Dacă se consideră că tensiunea la bornele secundarului rămâne nemodificată în timpul funcționării (în realitate tensiunea se modifică cu variația sarcinii) atunci se poate scrie:

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 = U_{2N} \cdot I_{2N} \cdot \left(\frac{I_2}{I_{2N}} \right) \cos \varphi_2 = S_N \cdot \beta \cdot \cos \varphi_2$$

Pierderile in înfășurări pot fi exprimate global prin:

$$p_j = R_{sc} \cdot I_1^2 = R_{sc} \cdot I_{1N}^2 \cdot \frac{I_1^2}{I_{1N}^2} = p_{jN} \cdot \beta^2$$

Iar expresia randamentului devine:

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_N \cdot \cos \varphi_2}{\beta \cdot S_N \cdot \cos \varphi_2 + \beta^2 \cdot p_{jN} + p_{Fe}}$$

**Variația $\eta=f(\beta)$ reprezintă, de asemenea,
caracteristica randamentului**

Valoarea maxima a randamentului se obține din:

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

adică:

$$\begin{aligned} \frac{d\eta}{d\beta} &= \\ &= \frac{S_N \cdot \cos \varphi_2 (\beta \cdot S_N \cdot \cos \varphi_2 + \beta^2 \cdot p_{jN} + p_{Fe}) - \beta \cdot S_N \cdot \cos \varphi_2 (S_N \cdot \cos \varphi_2 + 2\beta \cdot p_{jN})}{(\beta \cdot S_N \cdot \cos \varphi_2 + \beta^2 \cdot p_{jN} + p_{Fe})^2} \end{aligned}$$

$$\frac{d\eta}{d\beta} = 0 \Leftrightarrow \beta \cdot S_N \cdot \cos \varphi_2 + p_{Fe} + \beta^2 \cdot p_{jN} - \beta \cdot S_N \cdot \cos \varphi_2 - 2\beta^2 \cdot p_{jN} = 0$$

sau:

$$p_{Fe} - 2\beta^2 \cdot p_{jN} = 0$$

Valoarea lui β pentru care se obține valoarea maxima a randamentului este:

$$\beta_m = \sqrt{\frac{p_{Fe}}{p_{jN}}}$$

Valoarea maximă a randamentului este:

$$\eta_{max} = \frac{S_N \cdot \cos \varphi_2}{S_N \cdot \cos \varphi_2 + \beta_m \cdot p_{jN} + \frac{1}{\beta_m} \cdot p_{Fe}}$$

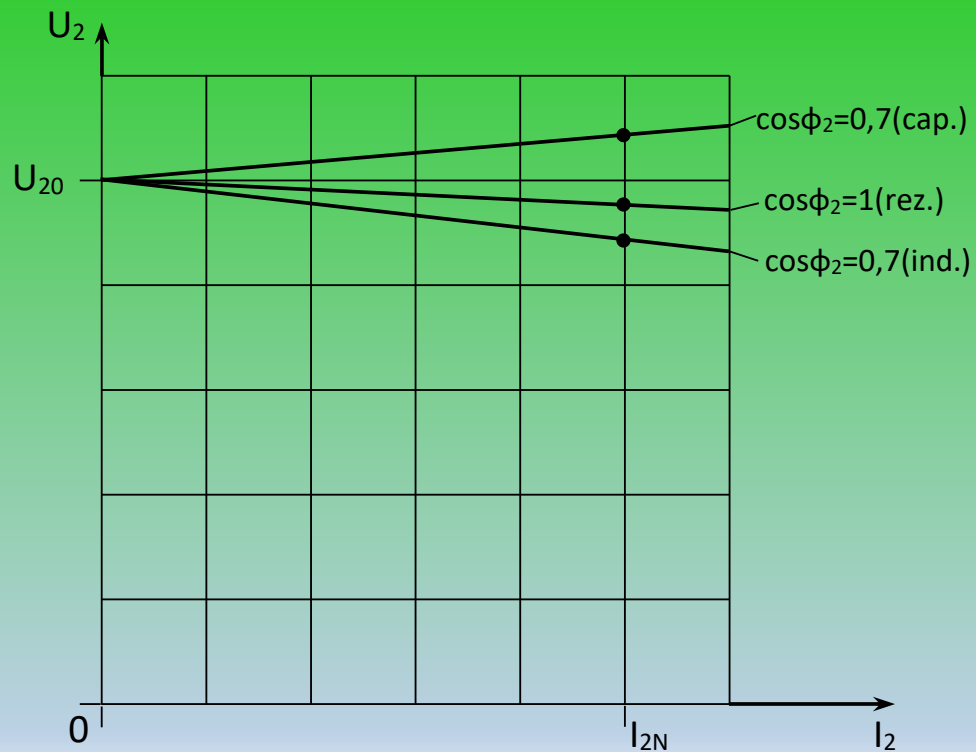
sau înlocuind valoarea maximă a lui β

$$\eta_{max} = \frac{S_N \cdot \cos \varphi_2}{S_N \cdot \cos \varphi_2 + \sqrt{\frac{p_{Fe}}{p_{jN}}} \cdot p_{jN} + \sqrt{\frac{p_{jN}}{p_{Fe}}} \cdot p_{Fe}}$$

adică:

$$\eta_{max} = \frac{S_N \cdot \cos \varphi_2}{S_N \cdot \cos \varphi_2 + 2 \cdot \sqrt{p_{Fe} \cdot p_{jN}}}$$

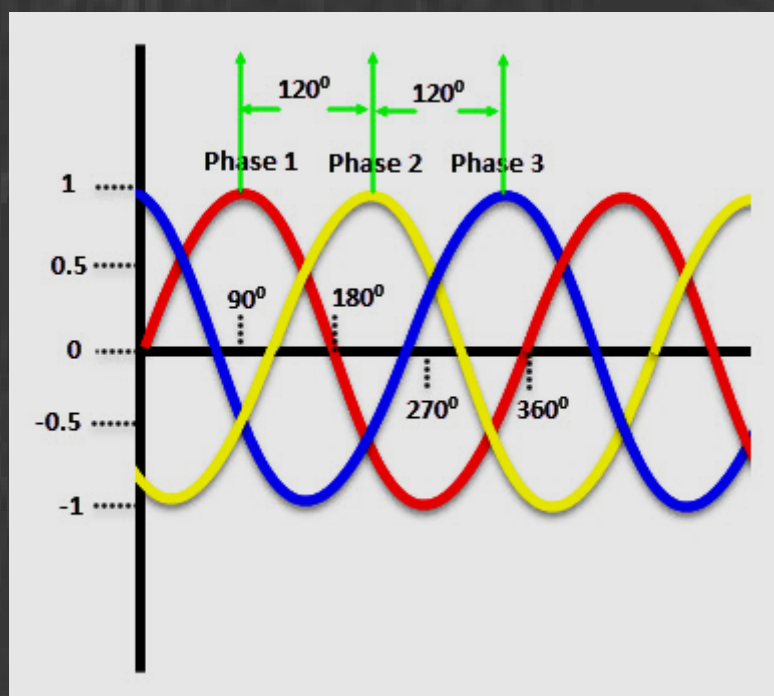
Caracteristica externă, $U_2=f(I_2)$



Caracteristica externă arată modul cum variază tensiunea la bornele secundare odată cu variația sarcinii. În cazul sarcinilor de tip rezistiv sau inductiv, tensiunea SCADĂ. Doar în cazul sarcinilor capacitive are loc o creștere a tensiunii odată cu creșterea sarcinii.

TRANSFORMATORUL TRIFAZAT

Transformatorul trifazat este varianta *polifazată* a transformatorului monofazat, care se asociază cu rețelele de energie electrică trifazată. El presupune un miez magnetic specific și câte cel puțin trei înfășurări monofazate primare respectiv secundare legate între ele după anumite tipuri de conexiuni.

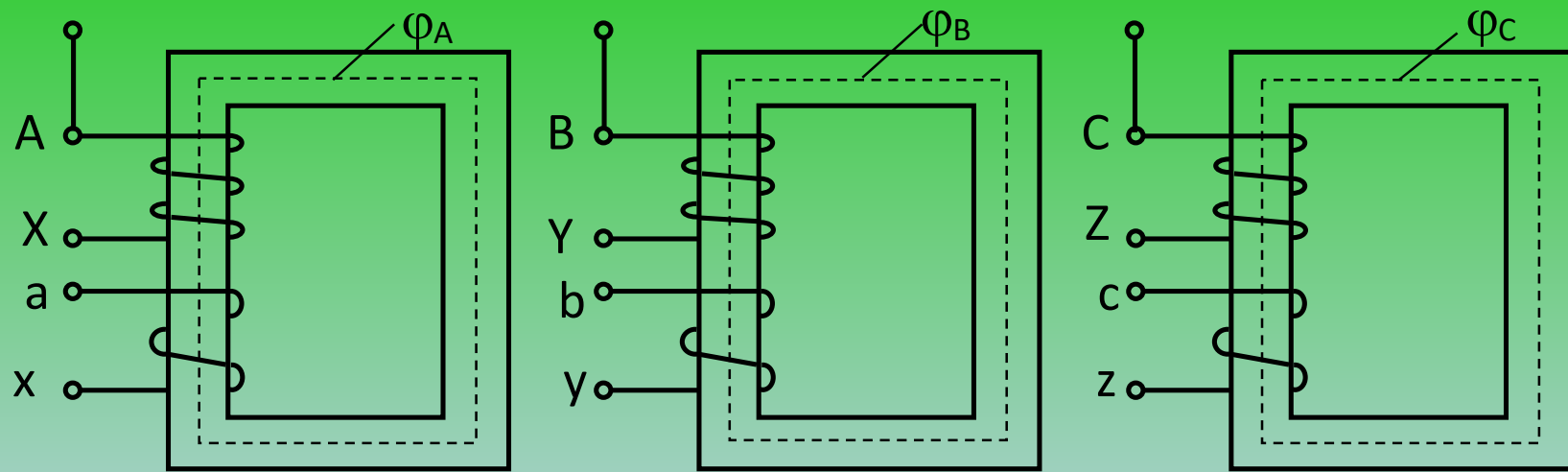


Sistemul de tensiuni, sinusoidal, presupune existența a trei tensiuni defazate temporal la 120°.

Grupul transformatoric este varianta ce folosește trei transformatoare monofazate identice (fig.a)

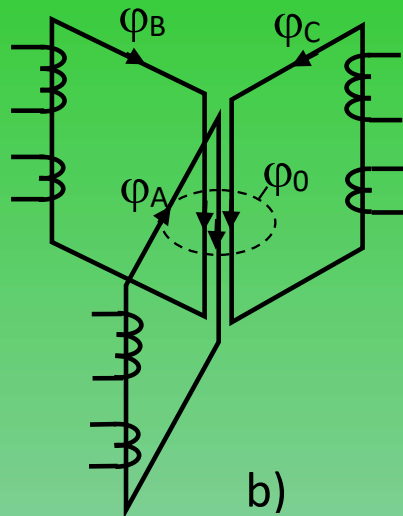
Caracteristic grupului transformatoric este faptul că fiecare fază are propriul circuit magnetic astfel încât fluxurile create (φ_A , φ_B , φ_C) sunt independente și au cale de închidere proprie („fluxuri libere”).

În mod evident, structura grupului transformatoric nu este compactă și, prin urmare, mai dificil de manipulat.

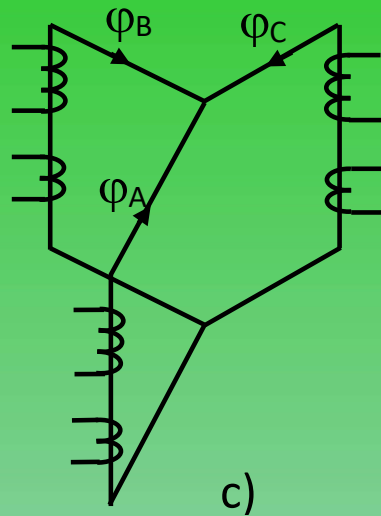


a)

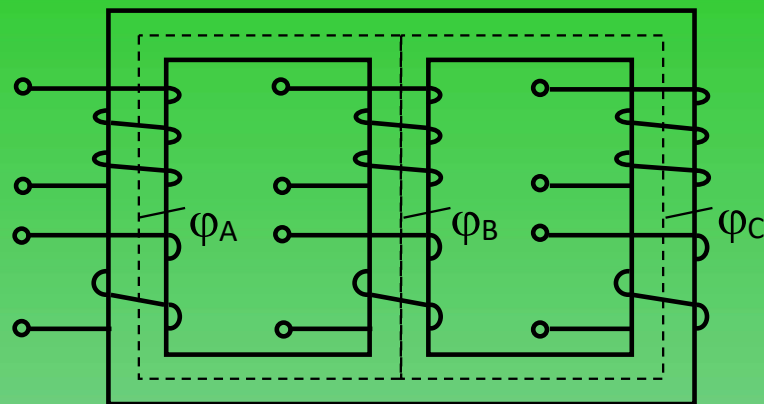
Grup transformatoric



b)

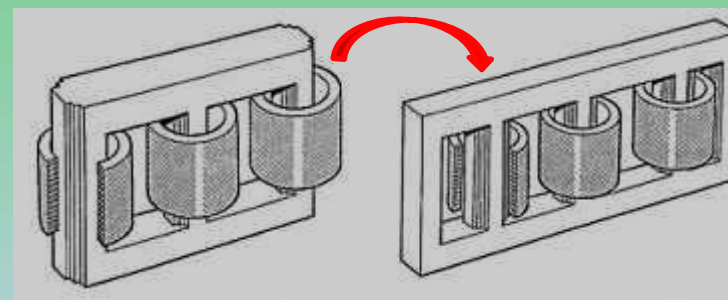


c)



d)

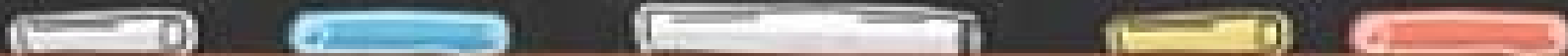
- b) Poziționare spațială simetrică (120°)
 c) Eliminarea coloanei centrale ($\varphi_A + \varphi_B + \varphi_C = 0$)
 d) Construcție trifazată „in plan” cu fluxuri forțate
 e) Construcție trifazată cu 5 coloane



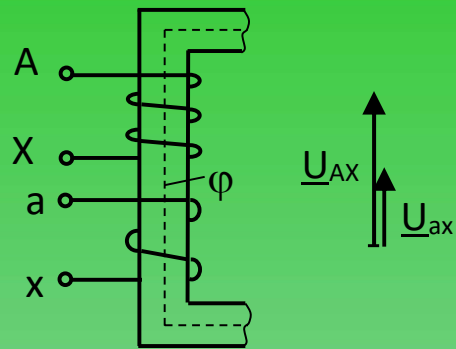
e)

Având în vedere specificul conexiunilor trifazate, se poate gândi o așezare a unităților monofazate în stea (fig. b). Analiza câmpului magnetic arată că, în cazul sistemului trifazat, suma fluxurilor prin coloanele libere (fără înfășurări și aflate în poziție alăturată) notată cu φ_0 este nulă.

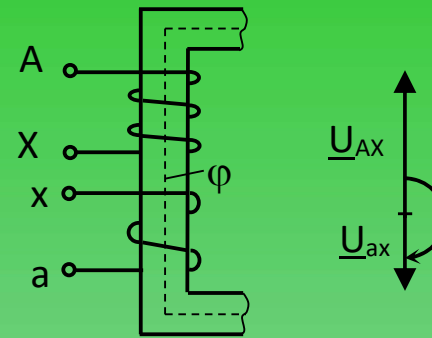
În aceste condiții se pot „contopi” coloanele respective (cele alăturate) după care, coloana centrală comună se elimină. Rezultă un miez magnetic de forma celui prezentat în fig. c. Aceasta construcție nu este însă o structură comod de utilizat (de ex, dificultăți de transport). Drept urmare se renunță la așezarea coloanelor defazate spațial la 120° și se obține structura „în plan” din fig. d. Aceasta este structura de transformator trifazat cea mai utilizată. Întrucât fluxurile create de fiecare fază sunt obligate să se închidă prin celelalte două coloane, construcția se numește „cu fluxuri forțate”. Este o construcție nesimetrică la care curenții pe cele trei faze nu sunt riguros egali. Pentru remedierea acestei situații se poate folosi varianta trifazată cu 5 coloane.



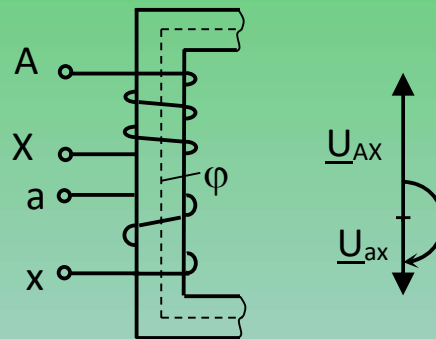
Fazorii tensiunilor induse in înfășurări



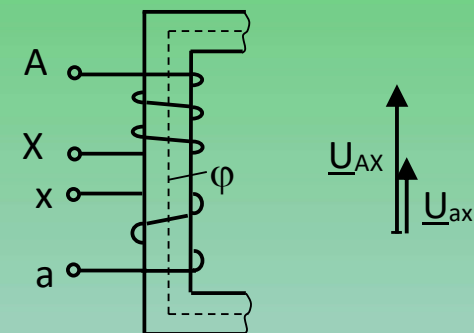
a)



b)



c)



d)

- a) Poziție identică (începuturi si sfârșituri de aceeași parte), sens de bobinare identic
- b) Poziție inversată (începuturi si sfârșituri pe părți diferite), sens de bobinare identic
- c) Poziție identică (începuturi si sfârșituri de aceeași parte), sens de bobinare invers
- d) Poziție inversată (începuturi si sfârșituri pe părți diferite), sens de bobinare invers

Întrucât tensiunile induse în înfășurările transformatoarelor sunt mărimi fazoriale, este necesar ca, în cazul transformatoarelor trifazate care au diverse tipuri de conexiuni între cele trei faze, să fie cunoscută poziția relativă a fazorilor.

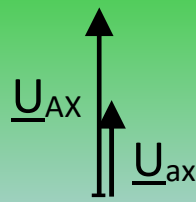
Sensul fazorului tensiunii induse într-o bobină depinde de două elemente:

- Sensul de bobinare;
- Desemnarea începutului și sfârșitului fiecărei bobine.

În figurile a-d de pe slide-ul anterior sunt prezentate cele patru situații posibile corespunzătoare prezenței pe o coloană a transformatorului a unei înfășurări de IT și a unei înfășurări de JT (marcarea bornelor se face cu litere mari pentru IT și cu litere mici pentru JT iar începuturile bobinelor se marchează cu litere de la începutul alfabetului iar sfârșiturile bobinelor cu litere de la sfârșitul alfabetului).



Pentru bobine plasate pe *aceeași* coloană, defazajul tensiunilor induse poate fi doar de 0° sau 180° .



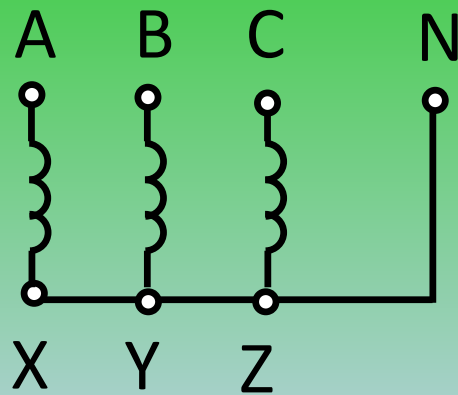
Definitie

Deplasarea unghiulara sau indicele orar este unghiul parcurs in sens orar de fazorul tensiunii de pe partea de IT pentru a se suprapune peste fazorul tensiunii omoloage de pe partea de JT.

Deplasare unghiulară minimă este de 30° , care reprezintă 1 oră (prin analogie cu cadranul unui ceas). Orice deplasare unghiulară este un multiplu de 30° .

Conexiunile transformatorului trifazat

Conexiunea STEA



Conexiune

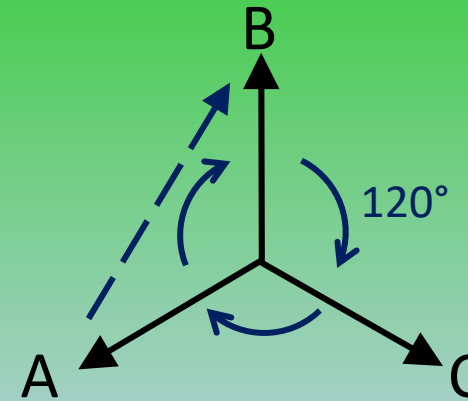
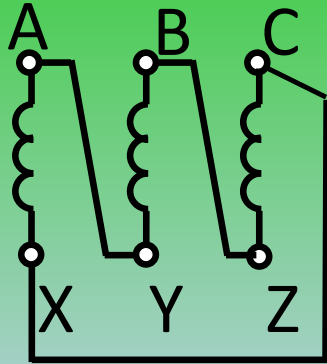


Diagrama fazorială

Se conectează împreună sfârșiturile SAU începuturile înfășurării trifazate. Capetele rămase libere se conectează la sursă sau la sarcină. Conexiunea se notează cu Y.

Conexiunile transformatorului trifazat

Conexiunea TRIUNGHI



Conexiune

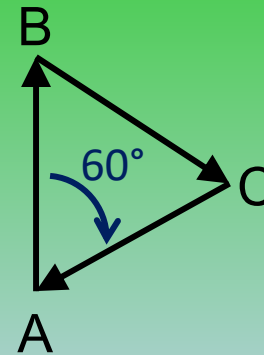
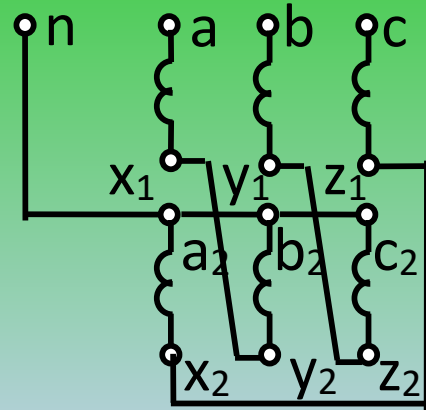


Diagrama fazorială

Se leagă începutul unei faze cu sfârșitul fazei de pe o altă coloană (practic se înseriază cele trei faze). Conectarea către sarcină sau alimentare se face fie la bornele de început fie la cele de sfârșit. Conexiunea se notează cu D.

Conexiunile transformatorului trifazat

Conexiunea ZIG-ZAG



Conexiune

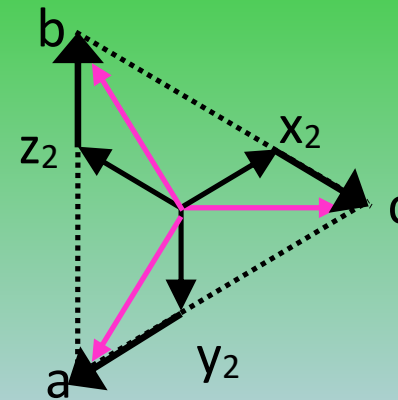


Diagrama fazorială

- Pe fiecare fază există 2 semibobine identice
- Este o conexiune stea la care se înseriază în opoziție câte două semibobine de pe coloane diferite
- Se realizează numai pe înfășurarea secundară
- Conexiunea se notează cu „z”.

Grupe de conexiuni

- Desemnează tipul conexiunilor de pe IT respectiv JT și deplasarea unghiulară.
- Se notează astfel: Yy, Yd, Yz, Dy, Dd, Dz urmat de valoarea deplasării unghiulare exprimată în indice orar. Ex: Yy2, Dz4, Dy3, Yz5, Dd6, Yd11, etc.
- Conexiunile Yy, Dd și Dz pot avea numai indice orar par
- Conexiunile Yd, Dy și Yz pot avea numai indice orar impar

Grupe de conexiuni

Gru pa	Simbol	Schema de conexiuni		Diagrama fazorială		Domeniul de utilizare
		IT	JT	IT	JT	
A	<u>Yy</u> 12					<u>Transformatoare</u> <u>coborâtoare</u> pen- <u>tru distribuție</u> de <u>forță</u> . <u>Transforma-</u> <u>toare ridicătoare</u> .
	<u>Dd</u> 12					<u>Transformatoare</u> <u>pentru tensiuni</u> <u>joase</u> și <u>pentru</u> <u>curenți intensi</u> .
	<u>Dz</u> 12					<ul style="list-style-type: none"> - <u>Trecerea</u> de la o <u>rețea</u> cu 3 fire la <u>alta</u> cu 4 fire, <u>fără defa-</u> <u>zaj</u>; - <u>Redresoare</u> <u>tri-fazate mono-</u> <u>alternantă</u>.

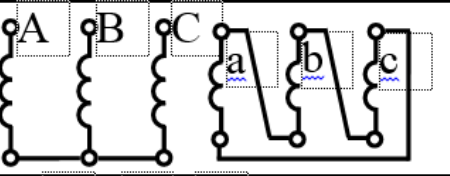
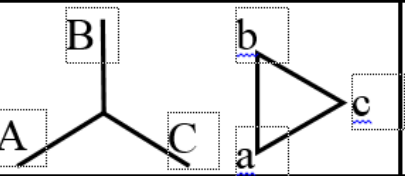
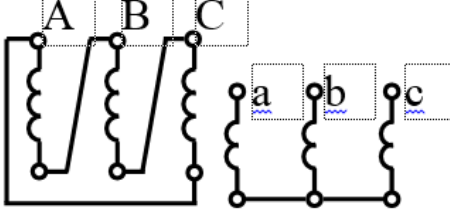
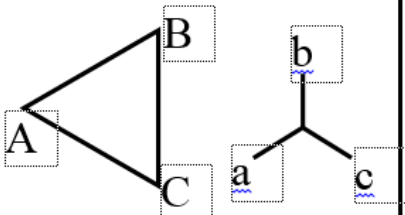
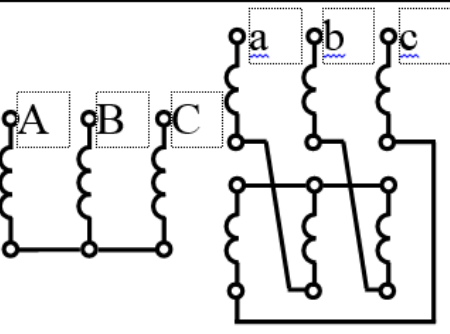
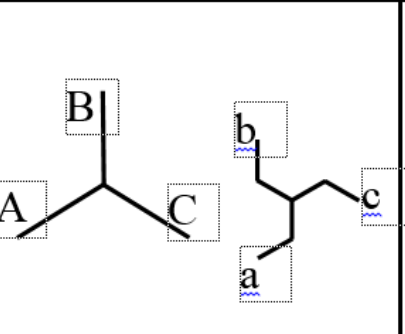
Grupe de conexiuni

B	<u>Yy</u> 6			Ca la <u>Yy</u> 12
	<u>Dd</u> 6			Ca la <u>Dd</u> 12
	<u>Dz</u> 6			Ca la <u>Dz</u> 12, cu <u>introducerea unui defazaj de 6 ore.</u>

Grupe de conexiuni

Gru pa	Simbol	Schema de conexiune		Diagrama fazorială		Domeniul de utilizare
		IT	JT	IT	JT	
C	Yd 5					Transformatoare ridicătoare pentru centrale și stații.
	Dy 5					Transformatoare coborâtoare pen- tru distribuție de lumină. Conducto- rul neutru se poate încărca 100%.
	Yz 5					Ca la Dy 5

Grupe de conexiuni

D	Yd 11			Ca la Yd 5
	<u>Dy</u> 11			Ca la <u>Dy</u> 5
	<u>Yz</u> 11			Ca la <u>Dy</u> 5, <u>numai pânã la puteri de 100 kVA.</u>

Raport de transformare

Conexiune	Yy	Yd	Yz	Dy	Dd	Dz
K	$\frac{N_1}{N_2}$	$\frac{\sqrt{3} \cdot N_1}{N_2}$	$\frac{2 \cdot N_1}{\sqrt{3} \cdot N_2}$	$\frac{N_1}{\sqrt{3} \cdot N_2}$	$\frac{N_1}{N_2}$	$\frac{2 \cdot N_1}{3 \cdot N_2}$



In cazul transformatoarelor trifazate, raportul de transformare, deci și tensiunea secundară, depind și de tipul conexiunilor din primar și secundar. Altfel spus, pe același transformator trifazat se pot obține diverse tensiuni în secundar numai prin modificarea tipurilor de conexiune.

Cuplarea in paralel a transformatoarelor trifazate



Conectarea in paralel apare necesară pentru următoarele situații:

- **Cazul alimentării receptoarelor ce se dezvoltă pe parcursul mai multor ani;**
- **Cazul variației periodice a sarcinii (sezoniere, de ex);**
- **Asigurarea continuității in caz de avarie a unui transformator;**
- **Asigurarea continuității pentru revizii periodice.**



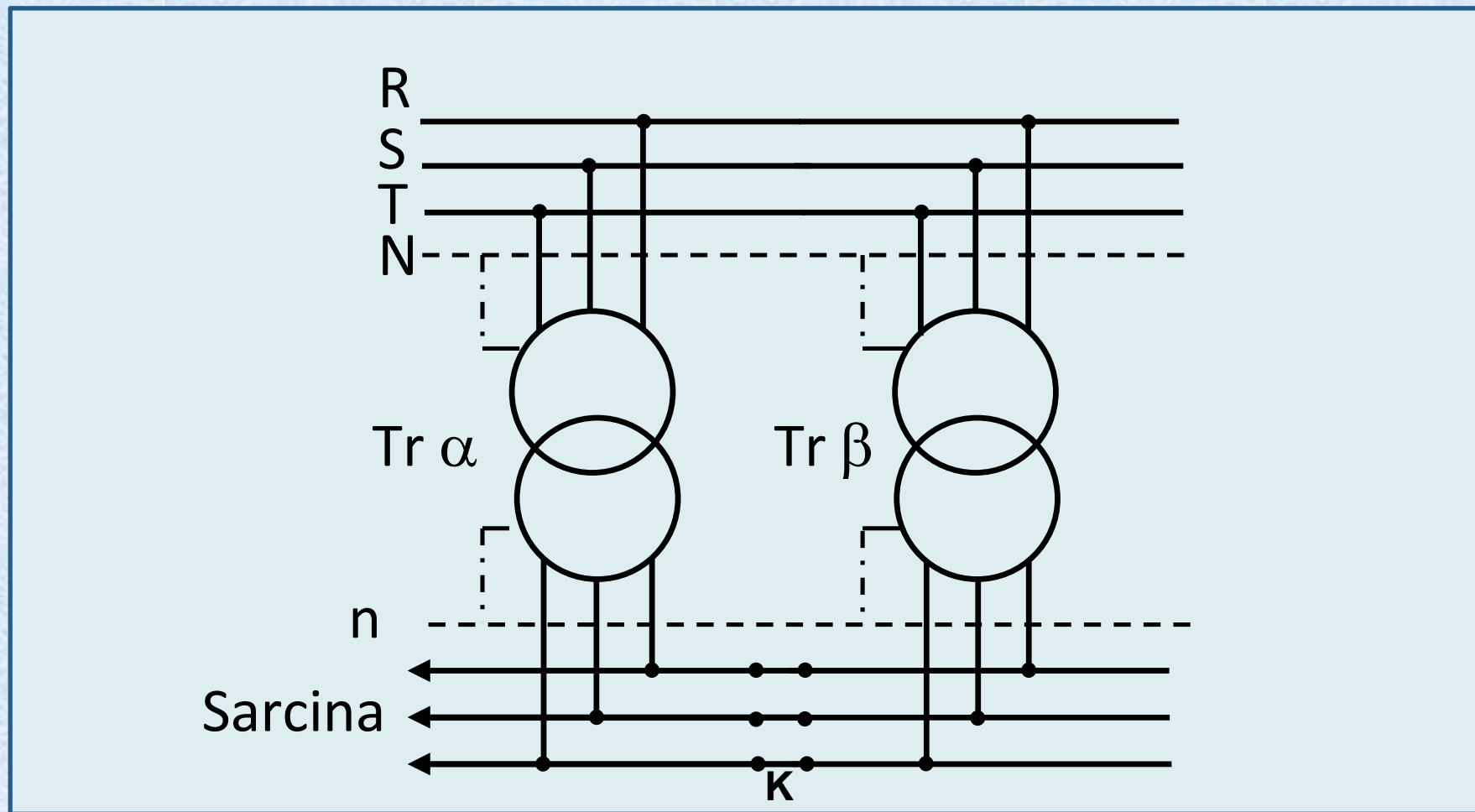
Conectare in paralel a transformatoarelor presupune:

- 1. Înfășurările primare sunt conectate la aceeași rețea de alimentare, cu tensiunea U_1**
- 2. Înfășurările secundare sunt conectate la aceeași rețea receptoare, cu tensiunea U_2**



Conectarea in paralel a două sau mai multe transformatoare, fie pe o rețea proprie, fie pe o rețea de putere foarte mare (considerată o rețea de putere „infinită” in comparație cu puterea transformatorului) NU se poate face decât dacă sunt îndeplinite anumite condiții de cuplare.

Conectare in paralel a doua transformatoare



Pentru determinarea condițiilor de cuplare in paralel, se consideră situația a două transformatoare notate cu $Tr\ \alpha$ respectiv $Tr\ \beta$. Înfășurările primare sunt conectate la aceeași sursă de tensiune iar cele secundare pe aceeași rețea de sarcină (având deci aceeași tensiune in secundar). Întrerupătorul K este închis ceea ce validează conectarea transformatorului $Tr\ \beta$ la rețeaua secundară comună.

Condițiile *generale* de cuplare in paralel pot fi formulate astfel:

- I. La funcționarea in gol a transformatoarelor, să nu apară curenți de circulație prin înfășurările secundare.**
- II. La funcționarea in sarcină, fiecare transformator trebuie să se încarce cu o putere proporțională cu puterea lui nominală iar curenții din secundar să fie pe cât posibil in fază.**

Explicate cu alte cuvinte, cele doua condiții impun ca:

- I. Atunci când sarcina este deconectată sau nu există sarcină, să nu existe curenți prin înfășurările secundare ale transformatoarelor.**
- II. Daca transformatoarele au puteri diferite (ceea ce se întâmplă frecvent), distribuirea puterii între cele doua transformatoare să se facă proporțional cu puterile lor, evitându-se supraîncărcarea unuia dintre ele în timp ce cel de-a doilea funcționează subîncărcat.**

Pentru determinarea matematică a celor două condiții generale se scriu primele 2 ecuații din sistemul de ecuații ale transformatorului real:

$$\left\{ \begin{array}{l} \underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jX_{\sigma 1} \cdot \underline{I}_1 - \underline{E}_1 \quad (1) \\ -\underline{U}'_2 = R'_2 \cdot \underline{I}'_2 + jX'_{\sigma 2} \cdot \underline{I}'_2 - \underline{E}_1 \quad (2) \end{array} \right.$$

Curentul de mers in gol, a cărui valoare este mult mai mică în comparație cu valorile curenților de sarcină, poate fi neglijat adică:

$$\underline{I}_1 + \underline{I}'_2 \cong 0 \quad \text{sau:} \quad \underline{I}_1 = -\underline{I}'_2$$

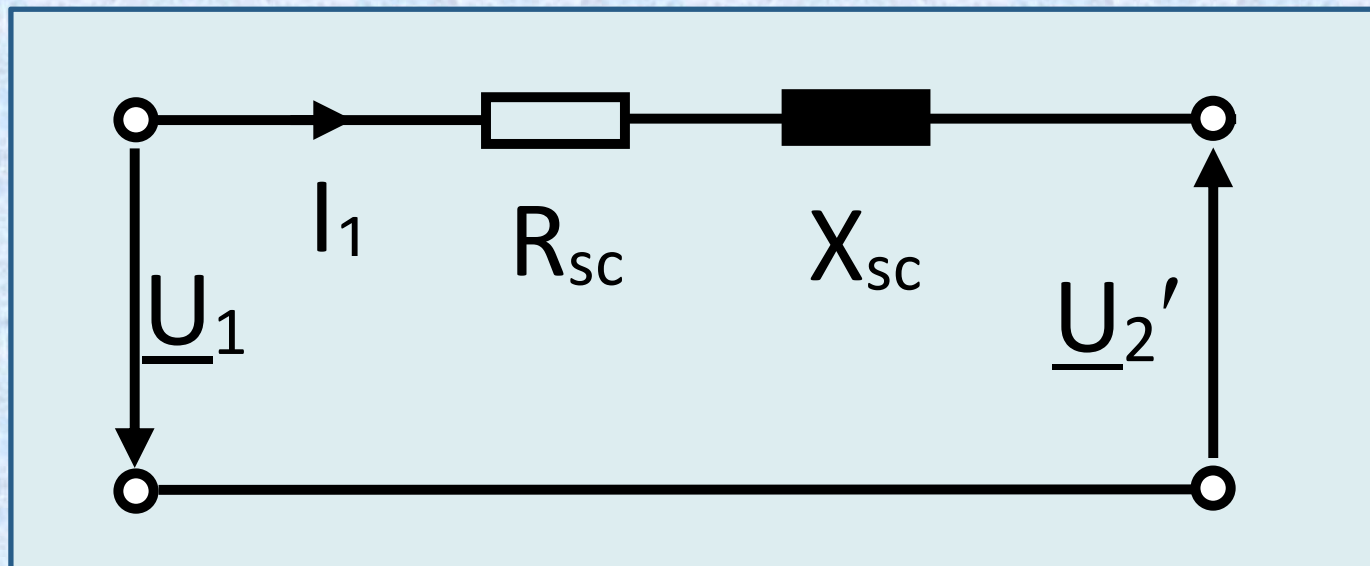
Scad ecuația 2 din ecuația 1 și înlocuiesc și curentul I'_2 :

$$\underline{U}_1 + \underline{U}'_2 = (R_1 + R'_2)\underline{I}_1 + j(X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2})\underline{I}_1$$

sau:

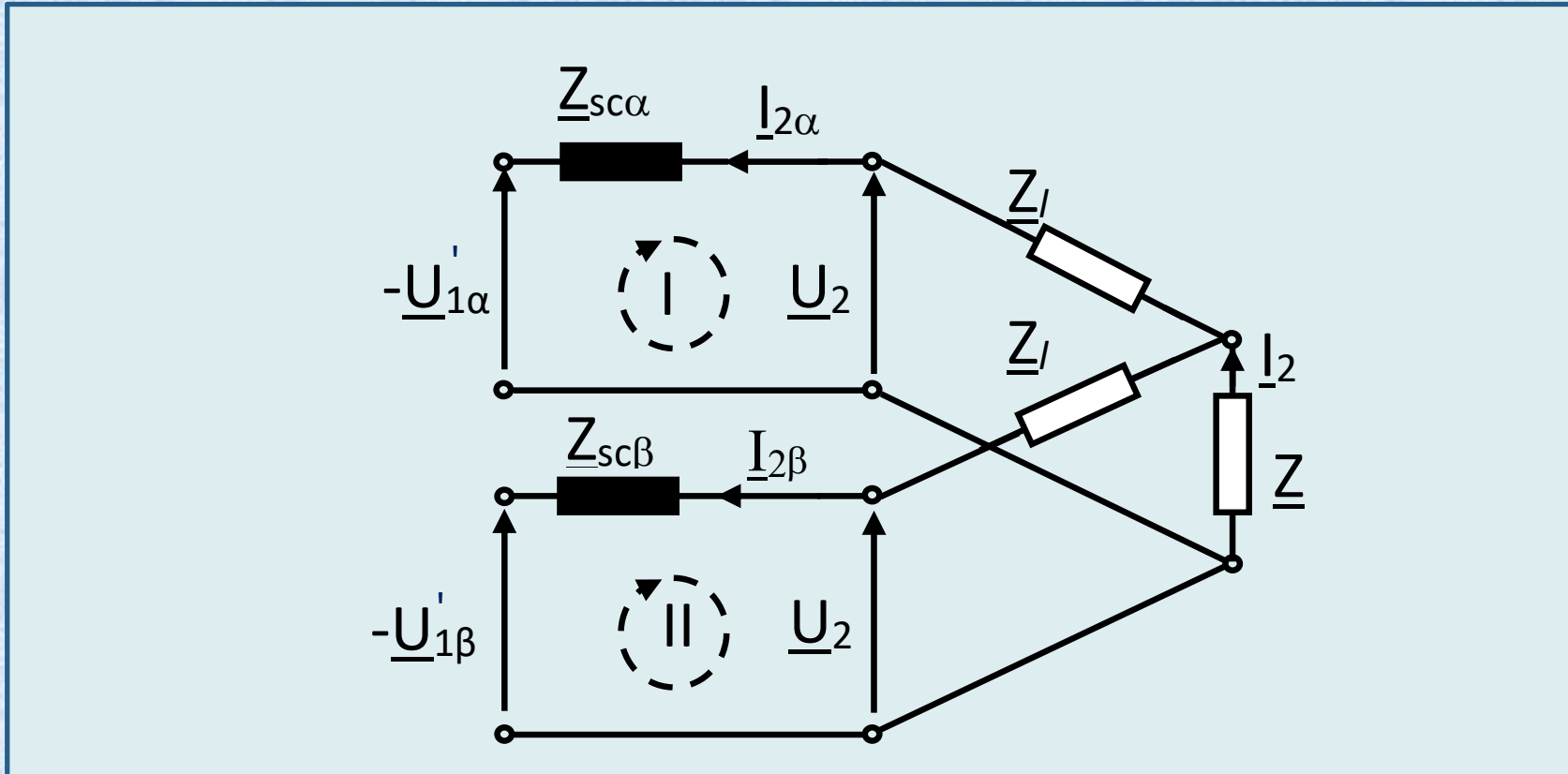
$$\underline{U}_1 = R_{sc}\underline{I}_1 + jX_{sc}\underline{I}_1 - \underline{U}'_2$$

Ultima ecuație obținută reprezintă ecuația „transformatorului cumulat”. Pe baza acestei relații se poate desena schema echivalentă:



Mărimile R_{sc} și X_{sc} pot fi obținute în urma încercării la scurtcircuit.

Schema echivalentă a transformatorului cumulat se poate utiliza, în continuare, pentru analiza cuplării în paralel a două transformatoare. Se consideră în figura de mai jos transformatoarele α și β , și mai exact câte o singură fază a transformatoarelor (analiza este repetabilă și identică pentru toate cele trei faze).



Rezistența și reactanța sunt grupate în impedanța de scurtcircuit \underline{Z}_{sc} , sarcina este reprezentată de impedanța \underline{Z} iar impedanța liniilor electrice este reprezentată de \underline{Z}_l . Schema echivalentă corespunde raportării circuitului primar la secundar (procedeu similar cu cel studiat anterior dar la care se consideră că numărul de conductoare din primar devine N_2).

Dacă se face raportarea circuitului primar la cel secundar atunci ecuația 1 de tensiuni devine:

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

Se obține pentru fiecare dintre circuitele transformatoarelor:

$$\left\{ \begin{array}{l} -\underline{U}'_{1\alpha} = \underline{Z}_{sc\alpha} \underline{I}_{2\alpha} + \underline{U}_2 \quad (1) \\ -\underline{U}'_{1\beta} = \underline{Z}_{sc\beta} \underline{I}_{2\beta} + \underline{U}_2 \quad (2) \\ \underline{I}_{2\alpha} + \underline{I}_{2\beta} = \underline{I}_2 \quad (3) \end{array} \right.$$

unde:

$$\underline{Z}_{sc\alpha} = R'_{1\alpha} + R_{2\alpha} + j(X'_{\sigma 1\alpha} + X_{\sigma 2\alpha})$$

$$\underline{Z}_{sc\beta} = R'_{1\beta} + R_{2\beta} + j(X'_{\sigma 1\beta} + X_{\sigma 2\beta})$$

Se scade ecuația 2 din ecuația 1:

$$-\underline{U}'_{1\alpha} + \underline{U}'_{1\beta} = \underline{Z}_{sc\alpha}\underline{I}_{2\alpha} - \underline{Z}_{sc\beta}\underline{I}_{2\beta}$$

dar: $\underline{I}_{2\beta} = \underline{I}_2 - \underline{I}_{2\alpha}$ și rezultă:

$$-\underline{U}'_{1\alpha} + \underline{U}'_{1\beta} = \underline{Z}_{sc\alpha}\underline{I}_{2\alpha} - \underline{Z}_{sc\beta}\underline{I}_2 + \underline{Z}_{sc\beta}\underline{I}_{2\alpha}$$

Respectiv curentul prin transformatorul α :

$$\underline{I}_{2\alpha} = \frac{\underline{Z}_{sc\beta}}{\underline{Z}_{sc\alpha} + \underline{Z}_{sc\beta}} \cdot \underline{I}_2 - \frac{\underline{U}'_{1\alpha} - \underline{U}'_{1\beta}}{\underline{Z}_{sc\alpha} + \underline{Z}_{sc\beta}}$$

Analog: $\underline{I}_{2\alpha} = \underline{I}_2 - \underline{I}_{2\beta}$ și curentul prin transformatorul β :

$$\underline{I}_{2\beta} = \frac{\underline{Z}_{sc\alpha}}{\underline{Z}_{sc\alpha} + \underline{Z}_{sc\beta}} \cdot \underline{I}_2 + \frac{\underline{U}'_{1\alpha} - \underline{U}'_{1\beta}}{\underline{Z}_{sc\alpha} + \underline{Z}_{sc\beta}}$$

Componenta I_c reprezintă curentul de circulație care încarcă un transformator și îl descarcă pe celălalt:

$$\underline{I_c} = \frac{\underline{U'_{1\alpha}} - \underline{U'_{1\beta}}}{\underline{Z_{sc\alpha}} + \underline{Z_{sc\beta}}}$$

Curentul de circulație se anulează dacă: $\underline{U'_{1\alpha}} = \underline{U'_{1\beta}}$

Egalitatea celor două mărimi fazoriale presupune îndeplinirea condiției de egalitate în modul și fază. Condiția de egalitate a modulelor:

$$U'_{1\alpha} = U'_{1\beta}$$

ceea ce este echivalent cu: $U_1 \cdot \left(\frac{N_2}{N_1}\right)_\alpha = U_1 \cdot \left(\frac{N_2}{N_1}\right)_\beta$

adică: $\left(\frac{N_2}{N_1}\right)_\alpha = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)_\beta$

Condiția de egalitate a fazelor presupune ca tensiunile secundare să fie în fază. Acest lucru se întâmplă atunci când transformatoarele conectate în paralel fac parte din aceeași grupă de conexiuni.

In concluzie, prima condiție de cuplare in paralel care impune ca *la funcționarea in gol a transformatoarelor, să nu apară curenți de circulație prin înfășurările secundare* se traduce prin cele doua sub-condiții obținute din analiza circuitului electric:

Ia. Pentru a nu avea curenți de circulație la funcționarea in gol, transformatoarele trebuie să aibă același raport de transformare

Ib. Pentru a nu avea curenți de circulație la funcționarea in gol, transformatoarele trebuie să facă parte din aceeași grupă de conexiuni, deci tensiunile secundare să fie in fază

Verificarea condiției II pornește de la raportul curenților, considerând că nu există curenți de circulație:

$$\frac{\underline{I}_{2\alpha}}{\underline{I}_{2\beta}} = \frac{\underline{Z}_{sc\alpha}}{\underline{Z}_{sc\beta}}$$

unde: $\underline{Z}_{sc\alpha} = \frac{\underline{U}_{sc\alpha}}{\underline{I}_{2\alpha N}}$ $\underline{Z}_{sc\beta} = \frac{\underline{U}_{sc\beta}}{\underline{I}_{2\beta N}}$

Raportul curenților relativi din secundar devine in acest caz:

$$\frac{\frac{\underline{I}_{2\alpha}}{\underline{I}_{2\alpha N}}}{\frac{\underline{I}_{2\beta}}{\underline{I}_{2\beta N}}} = \frac{\underline{Z}_{sc\beta} \cdot \underline{I}_{2\beta N}}{\underline{Z}_{sc\alpha} \cdot \underline{I}_{2\alpha N}} = \frac{\underline{U}_{sc\beta}}{\underline{U}_{sc\alpha}} = \frac{\frac{\underline{U}_{sc\beta}}{\underline{U}_1} \cdot 100}{\frac{\underline{U}_{sc\alpha}}{\underline{U}_1} \cdot 100} = \frac{\underline{u}_{sc\beta}}{\underline{u}_{sc\alpha}} = \frac{\underline{u}_{sc\beta}}{\underline{u}_{sc\alpha}} \cdot e^{j(\varphi_{sc\beta} - \varphi_{sc\alpha})}$$

Concluzie condiția II: Tensiunile relative de scurtcircuit trebuie să fie egale in modul și fază.

Cumulând toate concluziile trase, se poate afirma că, pentru a putea fi cuplate în paralel două sau mai multe transformatoare, este necesară îndeplinirea următoarelor cerințe:

Tensiunile nominale primare trebuie să fie egale

Raportul de transformare să fie același

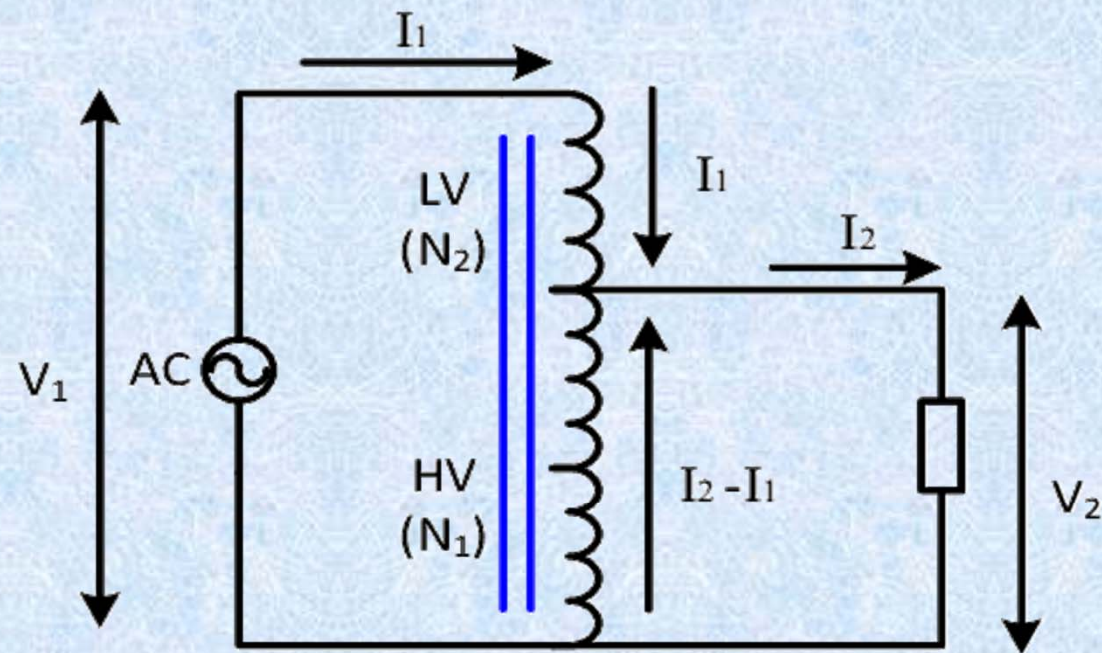
Transformatoarele trebuie să aparțină aceleiași grupe de conexiuni

Tensiunile nominale de scurtcircuit să fie egale (in modul și fază)

+

Puterile nominale ale transformatoarelor să nu depășească raportul 4:1

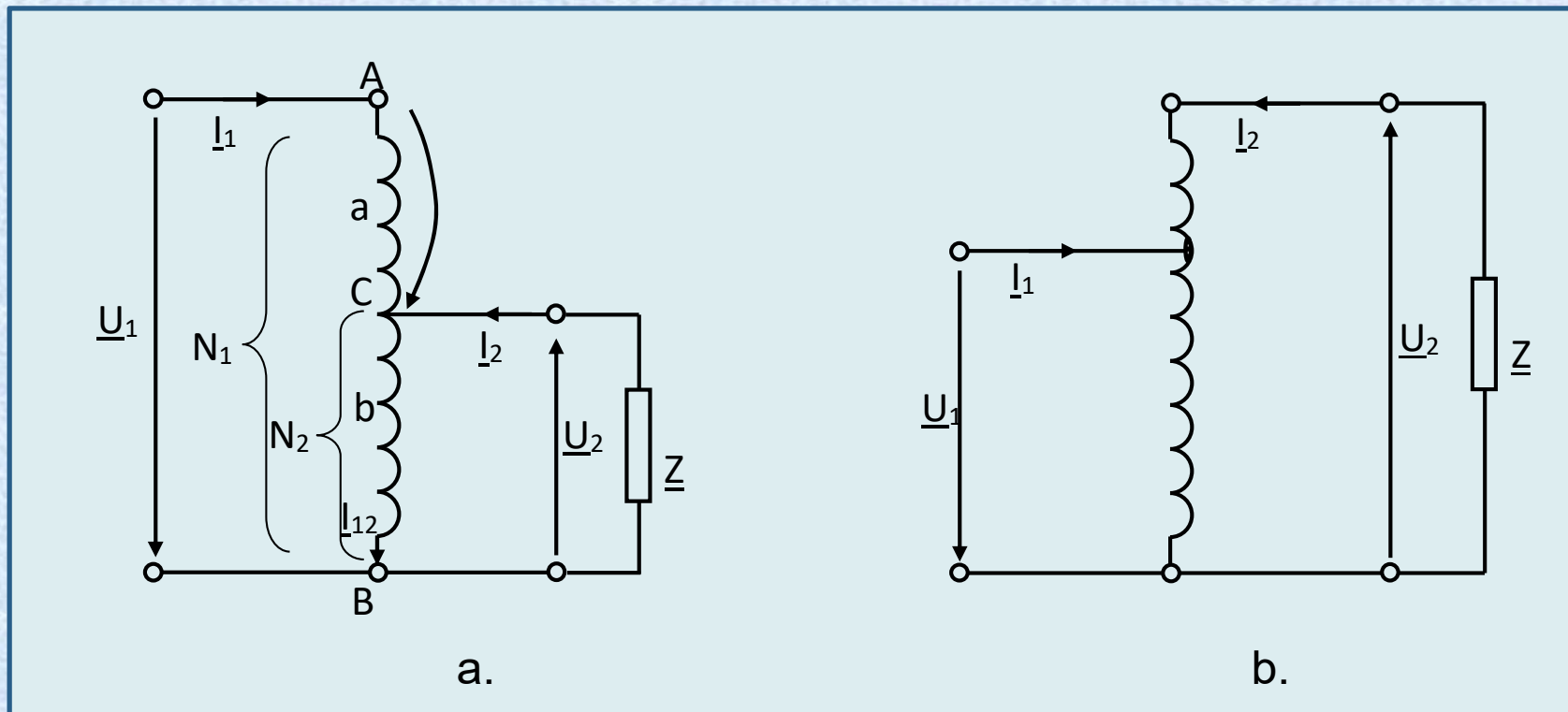
Autotransformatorul



Autotransformatorul este un transformator electric a cărui înfășurare de JT reprezintă o parte a înfășurării de IT. Prin urmare, autotransformatorul are o singură înfășurare plasată pe un miez magnetic identic cu cel al unui transformator.

În funcție de valoarea tensiunilor din primar și secundar, ATR poate fi coborâtor de tensiune (fig. a) sau ridicător de tensiune (fig. b).

Raportul de transformare poate fi constant (este cazul ATR de mare putere utilizate pentru interconectarea unor rețele diferite de transport al energiei electrice) sau variabil (la ATR de putere mică folosite cu precădere în laboratoare de încercarea mașinilor electrice).



Pentru scrierea ecuațiilor autotransformatorului vom lua ca bază de discuție varianta coborâtoare de tensiune (fig. a).

Teorema I a lui Kirchhoff pentru *nodul C* se poate scrie:

$$\underline{I_1} + \underline{I_2} = \underline{I_{12}}$$

De asemenea, ecuația solenațiilor este:

$$(N_1 - N_2)\underline{I_1} + N_2\underline{I_2} = N_1\underline{I_0}$$

Neglijând curentul de mers in gol, I_0 și înlocuind valoarea lui I_{12} in ecuația solenațiilor, se obține:

$$N_1 \cdot \underline{I_1} - N_2 \cdot \underline{I_1} + N_2 \cdot \underline{I_1} + N_2 \cdot \underline{I_2} = 0 \quad \text{sau} \quad N_1 \cdot \underline{I_1} + N_2 \cdot \underline{I_2} = 0$$

Raportul de transformare este același ca și in cazul transformatorului:

$$K = \frac{U_{1N}}{U_{20}} \cong \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Iar curentul I_{12} de pe porțiunea comuna este:

$$\underline{I_{12}} = \underline{I_1} + \underline{I_2} = -\frac{N_2}{N_1} \cdot \underline{I_1} + \underline{I_2} = \underline{I_2} \left(1 - \frac{1}{K} \right)$$

Pentru a face o comparație utilă între transformator și autotransformator, se poate face raportul puterilor lor de calcul (adică puterile lor electromagnetice).

$$P_{emATR} = E_1 \cdot I_1 = 4,44(N_1 - N_2) \cdot f \cdot \phi_m \cdot I_1 = 4,44 \cdot \frac{N_1 - N_2}{N_1} \cdot N_1 \cdot f \cdot \phi_m \cdot I_1$$
$$= 4,44 \cdot N_1 \cdot f \cdot \phi_m \cdot I_1 \cdot \left(1 - \frac{1}{K}\right) = P_{emTR} \left(1 - \frac{1}{K}\right)$$

Puterea de calcul a ATR este mai mică decât cea a TR. Acest lucru se datorează faptului ca transferul de putere din primar in secundar se face pe doua căi: pe cale electromagnetică și pe cale galvanică.

Componenta $P\left(1 - \frac{1}{K}\right)$ reprezintă puterea transmisă pe cale galvanică.

In consecință, un ATR de o anumită putere este mai puțin voluminos decât un TR de aceeași putere.

Aceeași relație există și între tensiunile de scurtcircuit: $U_{1scATR} = U_{1scTR} \left(1 - \frac{1}{K}\right)$

ceea ce face ca valorile curenților de scurtcircuit la ATR sa fie mai mari decât la TR.

Autotransformatoarele sunt cu atât mai eficiente din punct de vedere economic cu cat raportul de transformare K este mai apropiat de valoarea 1. In consecință, ATR se construiesc cu rapoarte de transformare cuprinse între limitele $K=(1\div 2)$ și mai rar urcă spre valoarea 3.

Avantaje și dezavantaje ale ATR



- Transferul de putere se face pe cale electromagnetică și pe cale galvanică. Drept consecință, **PUTERE DE CALCUL** este mai mică la autotransformator decât la transformator. Rezultă dimensiuni și greutatea mai mici pentru același transfer de putere secundară.



- Tensiunea de scurtcircuit este mai mică la ATR decât la TR. Rezultă curenți de scurtcircuit mai mari.



- Nu există separare galvanică între primar și secundar.

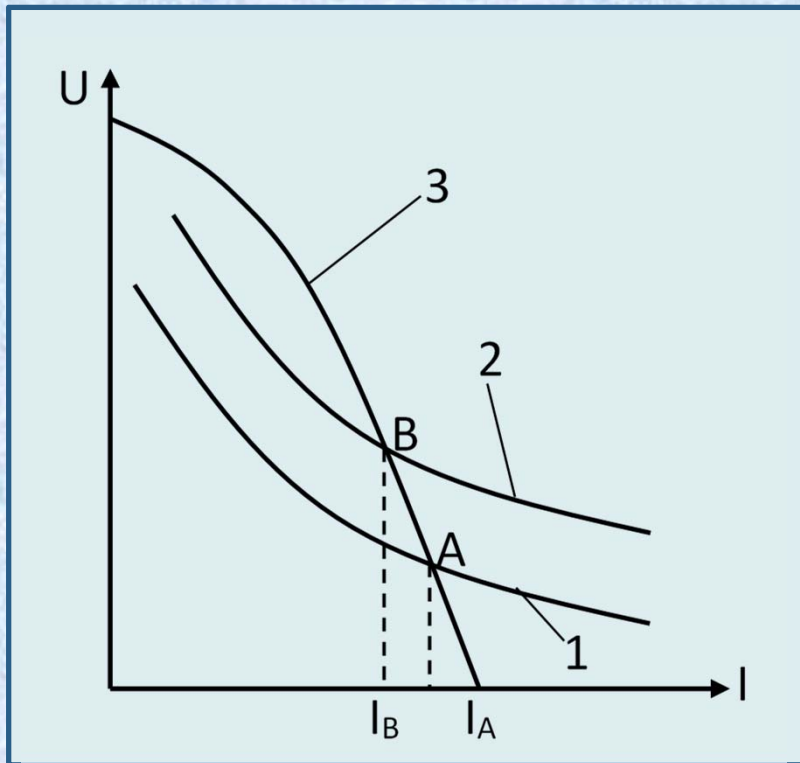


- Dacă se întrerupe înfășurarea secundară, atunci întreaga tensiune din primar se regăsește la bornele secundare.

TRANSFORMATOARE PENTRU SUDARE



Procesul de sudare electrică se caracterizează printr-o caracteristică „tensiune-curent” de forma celor prezentate pe figură (curbele 1 și 2). Diferența dintre ele apare datorită lungimii diferite a arcului electric.



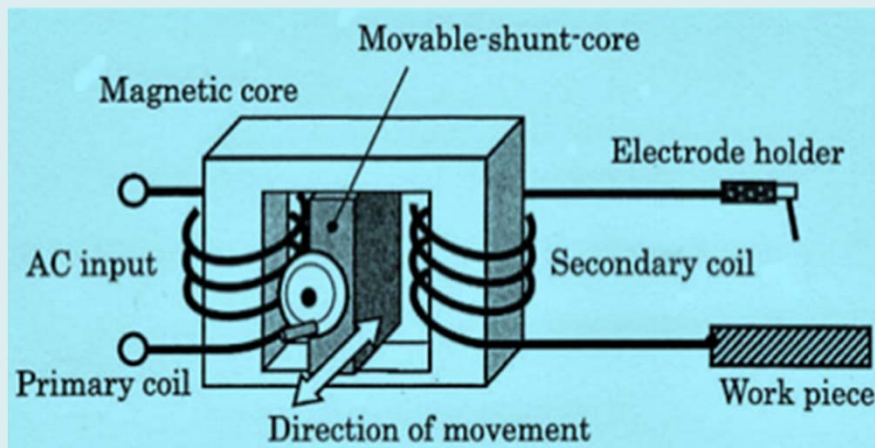
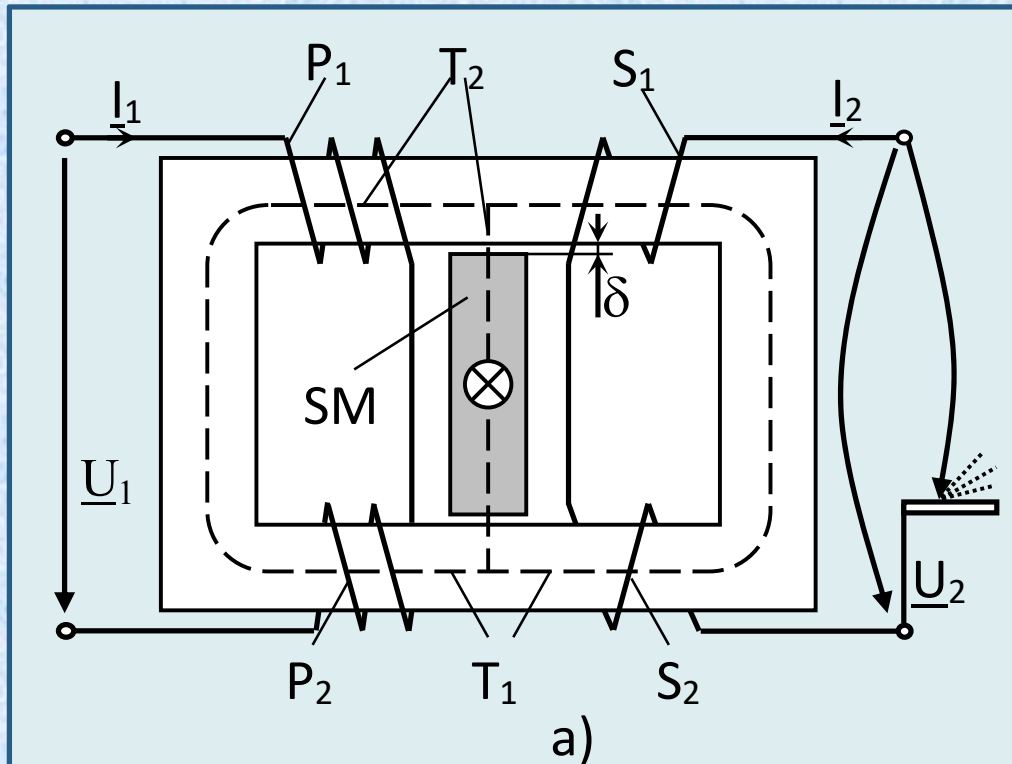
Sursa de tensiune ce alimentează arcul electric trebuie să aibă o caracteristică externă de forma curbei 3 de pe figură. Este vorba despre o caracteristică externă „extrem de căzătoare”. Acest lucru este necesar din două motive:

a) Modificarea lungimii arcului în timpul procesului de sudare să nu ducă la o modificare substanțială a curentului de sudare (vezi valorile I_A și I_B);

b) Realizarea inerentă a scurtcircuitului în timpul sudării (cazul sudării manuale) să nu ducă la apariția unui curent de scurtcircuit de valoare foarte mare, periculos sau distructiv pentru sursa de alimentare a arcului.

O posibilă soluție de sursă de alimentare pentru arcul electric specific sudării este transformatorul electric. Construcția acestuia trebuie însă realizată în așa fel încât caracteristica sa externă să fie foarte căzătoare.

Transformator de sudare cu șunt



Acest tip de transformator are o structură asemănătoare cu cea a transformatorului monofazat cu coloane. Aici, în mod obligatoriu, înfășurările primară și secundară sunt așezate pe coloane diferite sau sunt complet separate pe miez (nu se folosește construcția cilindrică având înfășurările plasate una peste cealaltă).

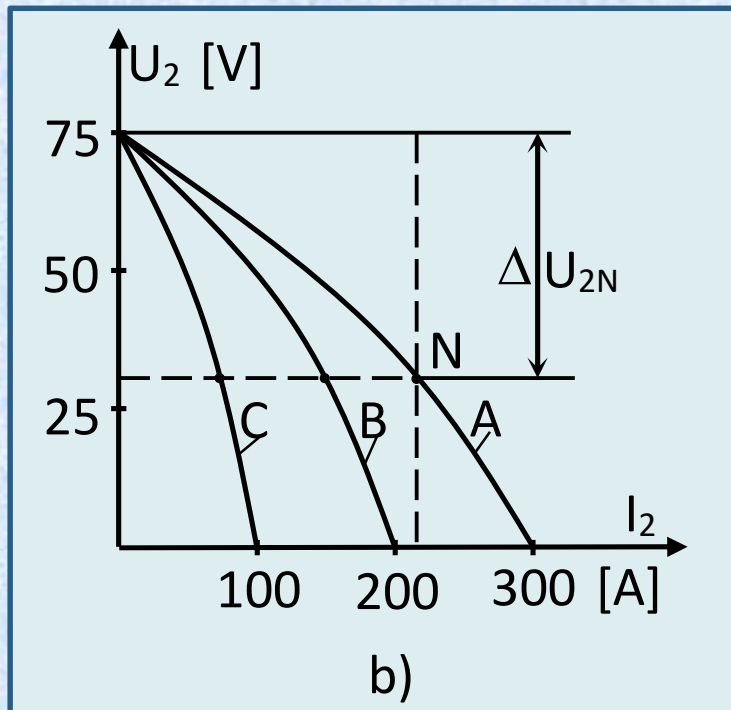
În plus, apare o *piesă feromagnetică mobilă*, denumită *șunt*, care este plasată în interiorul miezului magnetic. Ea poate fi deplasată în interiorul miezului putând ocupa orice poziție între „complet introdus” respectiv ”complet scos”. Evident, pentru a se putea realiza deplasarea șuntului, există două interstiii, notate pe figura cu δ , și care se comportă ca niște întrefieruri.

Electrodul de sudură și piesa sudată se conectează la cele două borne ale secundarului.

Să presupunem, pentru început, că șuntul este complet introdus.

a) *Transformatorul funcționează la gol* (curentul $I_2=0$ deci nu se sudează). Fluxul creat de înfășurarea primară se închide prin circuitul magnetic după traseul T_1 (fig. a) iar conform legii inducției electromagnetice induce o tensiune pe care o putem nota cu U_0 . Întrucât șuntul magnetic este separat de miezul magnetic prin cele doua întrefieruri, liniile de câmp magnetic nu se închid prin acesta. Șuntul este practic nefolosit.

b) Transformatorul funcționează în sarcină (există arc electric, are loc procesul de sudare, $I_2>0$). În această situație, curentul din secundar creează un flux care este antagonist fluxului creat de înfășurarea primară. Situația este echivalentă cu creșterea reluctanței circuitului magnetic. Drept consecință, o parte a fluxului magnetic creat de înfășurarea primară se va închide prin șuntul magnetic (traseul T_2 din fig. a) fără a mai înlănțui spirele înfășurării secundare. Acest lucru va determina o scădere a tensiunii induse în înfășurarea secundară și deci o tensiune mai mică la bornele secundarului. Cu cât curentul secundar este mai mare cu atât tensiunea scade mai mult. Rezultă o caracteristică căzătoare precum caracteristica C din fig. b. La atingerea electrodului de piesă are loc scurtcircuitul dar datorită caracteristicii căzătoare, curentul nu crește peste valoarea suportată de înfășurarea secundară.

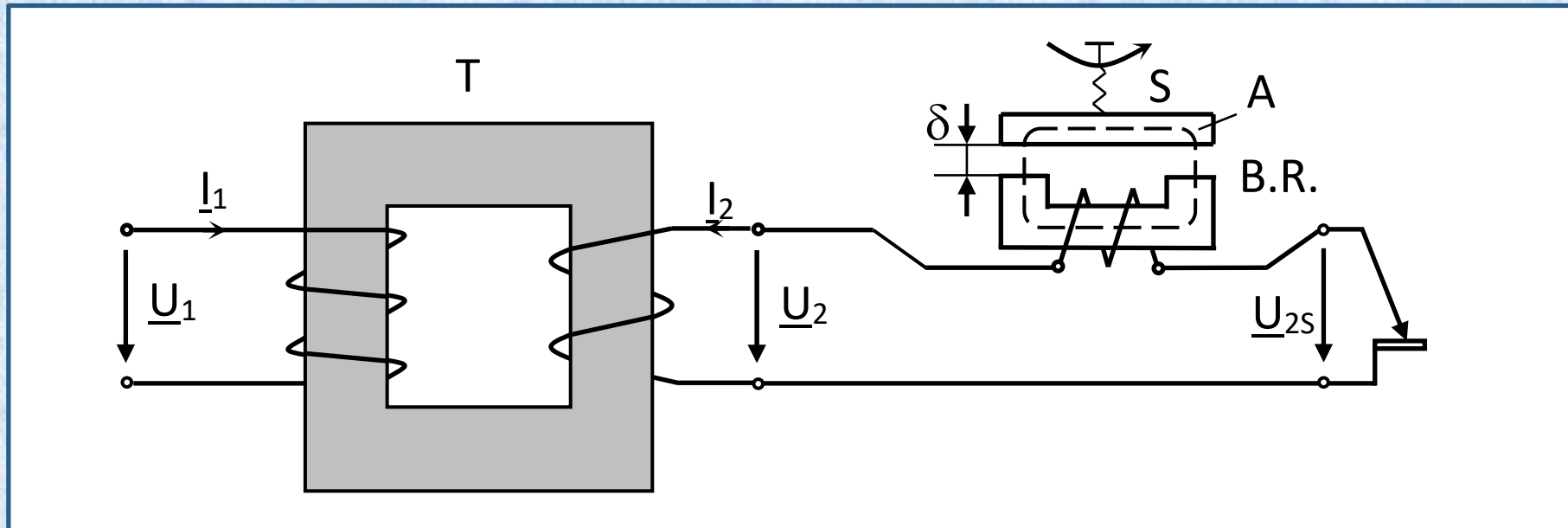


În cazul în care dorim un curent mai mare de sudare (fie piesele sudate sunt mai groase sau materialul pieselor cere acest lucru), se poate scoate parțial șuntul din interiorul miezului magnetic. Drept urmare, fluxul deviat prin șunt este mai mic, iar caracteristica externă a transformatorului este mai puțin căzătoare (caracteristica B din fig. b).

În cazul scoaterii complete a șuntului, se obține o caracteristică de tipul A (fig. b) unde se obțin curenții de sudare cei mai mari.

În practică, transformatorul cu șunt are un dispozitiv mecanic ce permite sudorului să modifice poziția șuntului și deci valoarea curentului de sudare.

Transformator de sudare cu bobina de reactanță reglabilă



Această soluție folosește un transformator obișnuit, T si o bobină de reactanță reglabilă, BR. Aceasta are o armatură mobilă ce permite modificarea întrefierului δ si deci a căderii de tensiune pe bobină. Cu cât întrefierul este mai mic cu atât căderea de tensiune este mai mare.

**PRODUCER
and
PERFORMER**

