

Mașini Electrice Clasice I

Indrumător de laborator

Mașina de curent continuu
Transformatorul
Masina Asincronă
Mașina Sincronă



PREFAȚĂ

Îndrumarul pentru lucrările de laborator la disciplina „Mașini electrice I”, se adresează studenților de la Facultatea de Inginerie Electrică, precum și inginerilor din domeniul energetic și electric. Prin conținutul lui, în care un loc preponderent îl ocupă prezentarea principalelor de funcționare a mașinilor electrice clasice care au o utilizare largă în instalațiile electroenergetice și electromecanice, lucrarea de laborator are rolul de a accentua latura aplicativă a cunoștințelor teoretice predate la curs, de a permite familiarizarea studenților cu aspectele constructive și funcționale ale mașinilor și echipamentelor electrice de control, respectiv cu modul de utilizare al acestora. Structura lucrărilor de laborator este astfel concepută încât să faciliteze înțelegerea sensului fizic al parametrilor, caracteristicilor și funcționalității mașinilor electrice, asimilarea procedurilor curente de verificare a randamentului acestora, cunoașterea și utilizarea echipamentului necesar pentru încercări. Se iau, de asemenea, în vedere aspectele utilizării corespunzătoare a elementelor de calcul aferente încercării mașinilor electrice și interpretarea corectă a rezultatelor obținute.

Acest volum al îndrumarului cuprinde un număr de 5 lucrări care urmăresc prezentarea:

- Mașinii de Current Continuu;*
- Transformatorul Electric;*
- Mașina de Inducție (Asincronă);*
- Mașina Sincronă.*

Ne exprimăm speranța că apariția acestei ediții a îndrumarului de laborator la disciplina de Mașini Electrice I va reprezenta o premiză importantă pentru o cât mai bună pregătire profesională a studenților noștri.

Cluj-Napoca, Iunie 2023

Autorii

Cuprins

1. NORME DE SECURITATE.....	5
1.1. Instrucțiuni generale privind folosirea echipamentului.....	5
2. PROBLEME FUNDAMENTALE ÎN MAȘINI ELECTRICE.....	9
2.1. Noțiuni introductive	9
2.1.1. Plăcuța de identificare	9
2.1.2. Tipurile de conexiune.....	10
2.1.3. Triunghiul puterilor	13
2.2. Clasificarea mașinilor electrice	13
2.3. Circuitele mașinilor electrice	14
2.3.1. Circuitul magnetic (miez magnetic)	15
2.3.2. Circuitul electric (înfășurările).....	16
2.3.3. Circuitul mecanic și de răcire.....	17
2.4. Legea inducției electromagnetice.....	17
2.5. Pierderi în mașini electrice	18
2.5.1. Pierderi în circuitele magnetice (pierderi în Fier).	19
2.5.2. Pierderi electrice și mecanice	20
2.6. Aplicații.....	20
2.6.1. Experiment 1	20
2.6.2. Experiment 2	21
2.6.3. Identificarea elementelor constructive ale mașinilor electrice	22
2.6.4. Probleme.....	22
3. MAȘINA DE CURENT CONTINUU	23
3.1. Încercările mașinii de curent continuu cu excitație derivație.....	23
3.1.1. Caracteristica naturală a motorului de curent continuu.....	23
3.1.2. Caracteristicile artificiale ale motorului de curent continuu	23
3.1.3. Determinarea a caracteristicilor de sarcină, naturală și artificiale	24
3.2. Încercările motorului de curent continuu cu excitație serie	24
4. TRANSFORMATORUL ELECTRIC	26
4.1. Noțiuni introductive	26
4.2. Regimurile de limită de funcționare.....	26
4.2.1. Regimul de mers în gol	26
4.2.2. Regimul de scurtcircuit	27
4.3. Legarea în paralel	27
4.4. Încercările transformatorului electric monofazat	27
4.4.1. Scopul lucrării	27
4.4.2. Scheme de montaj și modul de lucru	28
4.5. Funcționarea în paralel a transformatoarelor	31
4.5.1. Scopul lucrării	31
4.5.2. Scheme de montaj și modul de lucru	32
4.6. Interpretarea rezultatelor și concluzii	34
5. MAȘINA DE INDUCȚIE (ASINCRONĂ).....	35
5.1. Noțiuni introductive	35
5.2. Regimurile de limită de funcționare a mașinii de inducție.....	37
5.2.1. Regimul de motor de mers în gol	37
5.2.2. Regimul de scurtcircuit	38

5.2.3.Determinarea parametrilor schemei echivalente	39
5.3. Caracteristicile de funcționare ale motorului de inducție.....	40
5.3.1.Scheme de montaj și modul de lucru	40
6. MAȘINA SINCRONĂ.....	42
6.1. Caracteristicile Generatorului Sincron Autonom.....	43
6.1.1.Scheme de montaj și modul de lucru	43
6.1.2.Regimul de mers în gol	44
6.1.3.Regimul de mers în scutcircuit simetric	44
6.1.4.Regimul de mers în sarcină inductivă	44
6.2. Cuplarea la rețea și funcționarea în paralel a generatorului sincron	45
6.2.1.Scheme de montaj și modul de lucru	45
6.2.2.Conectarea la rețea a generatorului sincron	46
6.2.3.Funcționarea generatorului sincron în paralel cu rețeaua.....	46
7. APLICATII	
Referinte	53

1. Norme de securitatea muncii specifice laboaratoarelor de mașini și acționări electrice

În oricare dintre experimente, folosirea unei tensiuni înalte crește pericolul de electrocutare. Din acest motiv folosim doar cabluri izolate, asigurându-ne că nu există scurtcircuit. Întotdeauna trebuie avut grijă să se verifice montarea corectă a circuitului și să nu se cupleze sursa de energie decât după o verificare completă a montajului. De cate ori este posibil , este bine să se folosească un instrument pentru monitorizarea curentului din circuit. Arborele intermediar de transmisie se folosește ca protecție împotriva contactului cu părțile rotative ale motorului. Trebuie respectate toate normele de protecție a muncii privind modul de lucru cu echipamentele electrice aplicabile.

1.1. Instrucțiuni generale privind folosirea echipamentului

- a) este interzisă activitatea studenților nesupravegheați în laborator.
- b) să respecte succesiunea operațiilor indicate în lucrările de laborator din îndrumător;
- c) să cunoască temeinic conținutul lucrărilor, în eventualitatea unui accident se va întrerupe imediat alimentarea tabloului de distribuție;
- d) nici un montaj, instalație nu se vor pune sub tensiune până nu a fost verificat de cadrul didactic sau tehnician;
- e) orice modificare într-un montaj se face numai după ce montajul a fost scos de sub tensiune, înainte de repunerea montajului sub tensiune în mod obligatoriu este necesară verificarea de către cadru didactic sau tehnician;
- f) alegerea aparatelor de măsură și a valorii tensiunilor de alimentare se face cunoscând valorile mărimilor nominale ale mașinilor electrice respective;
- g) înainte de efectuarea unui montaj se verifică absența tensiunii la bornele standului de încercare;
- h) legăturile din circuitul de forță se realizează cu conductoare de secțiune potrivită, în funcție de valoarea curentului;
- i) legăturile la bornele mașinilor se vor executa cu atenție, verificându-se dacă sunt strânse și dacă papucii cablurilor de legătură învecinați nu se ating;
- j) înainte de cuplarea întrerupătorului se verifică poziția cursorilor rezistențelor, domeniul instrumentelor de măsură, starea tehnică a cuplajului, strângerea buloanelor de fixare;
- k) este interzisă atingerea carcaselor și a părților în mișcare ale mașinilor electrice în timpul funcționării acestora;
- l) este interzisă atingerea părților neizolate aflate sub tensiune;
- m) manevrarea reostatelor de pornire și reglaj se face numai de pe covoare sau podele electroizolante;
- n) este obligatorie urmărirea indicațiilor aparatelor de măsură și control imediat după pornirea unui motor electric;
- o) la pornirea motorului sincron este obligatorie scurtcircuitarea înfășurării de excitație pentru o rezistență în scopul limitării supratensiunilor;
- p) este interzisă pornirea motorului serie de c.c. în gol. Pentru această se cuplează mai întâi sarcină motorului;
- q) este interzisă staționarea în dreptul cuplajelor, la funcționarea mașinilor;
- r) verificarea sensului de mișcare a mașinilor electrice nu se face cu mână;
- s) în cazul când s-au ars siguranțele se deconectează întrerupătoarele de alimentare ale instalației;

1.2. Standul de lucru

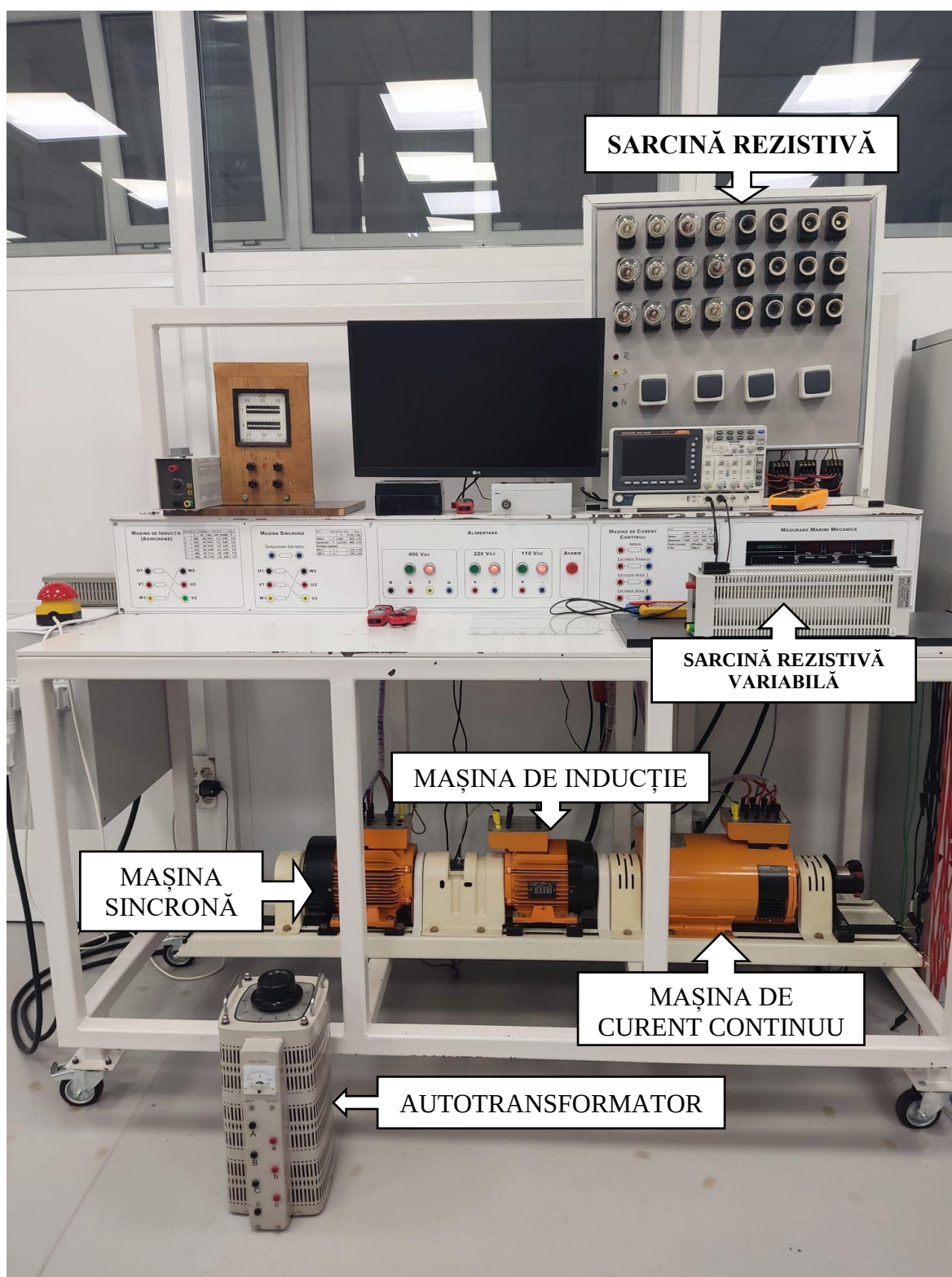


Fig.1.1. Standul de lucru

Elementele principale ale standului de lucru sunt cele trei mașini electrice cuplate mecanic între ele. Asta înseamnă că la pornirea uneia dintre mașini, automat se vor roti și celelalte. Nu există posibilitatea decuplării mecanice dintre mașini.

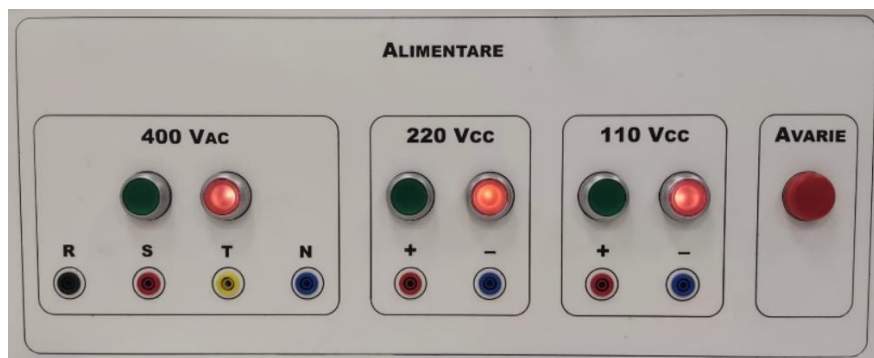


Fig.1.2. Bornele de alimentare

La stand avem o serie de borne de alimentare de la rețeaua trifazată de tensiuni, în alternativ, de 400v de unde putem să legăm și tensiunea de fază (tensiunea dintre o fază și nul) pentru alimentarea echipamentelor monofazate. De asemenea avem si două borne de alimentare in current continuu de 220 volți respectiv de 110 volți pentru echipamentele, sistemele sau mașinile de curent continuu.

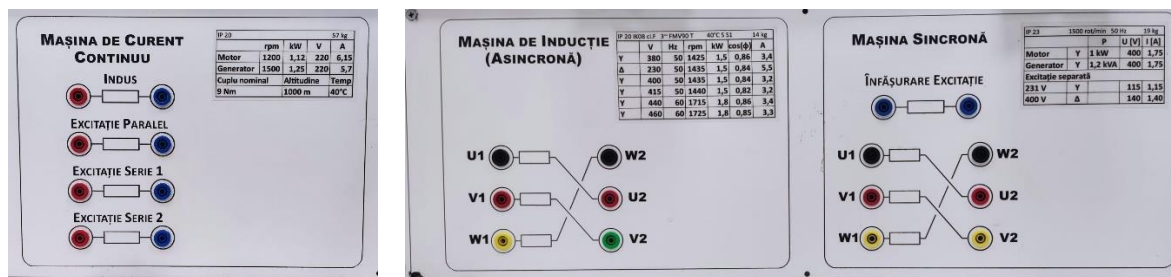


Fig.1.3. Bornele mașinilor electrice

Bornele mașinilor sunt ca o extensie în panoul frontal și există posibilitatea conectării în funcție de cerințele fiecărei lucrări de laborator respective, pentru mașina de current continuu, avem conexiunea series au derivație și pentru celelalte mașini se pot face conexiuni de tip stea sau triunghi.



Convertor CSF



Fig.1.4. Echipamente auxiliare



Sincronoscop

Standul mai dispune de echipamente auxiliare ce vin în ajutorul realizării montajelor de lucru și anume un convertor static de frecvență (CSF) utilizat în alimentarea mașinilor de current alternativ, un sincronoscop utilizat în sincronizarea rețelei de alimentare cu mașina sincronă și echipamente de măsură de turație și cuplu. Celelalte aparate de măsură mobile vor fi conectate independent pentru fiecare aplicație în funcție de cerințe.

1.3. Aparate de măsură

Un multimetru este un instrument de măsurare absolut necesar pentru măsurători. Combină cel puțin trei caracteristici esențiale: un voltmetru, un ohmetru și un ampermetru, iar în unele cazuri continuitatea. Un multimetru vă permite să înțelegeți ce se întâmplă într-un circuit.

Un multimetru este format din patru secțiuni esențiale:

- Afișare: aici sunt afișate măsurătorile
- Buton de selecție: aceasta selectează ceea ce doriți să măsurați
- Porturi: aici conectați sondele

Sonde: un multimetru vine cu două sonde. În general, unul este roșu, iar celălalt negru. Nu există nicio diferență între sondele roșu și negru, doar culoarea. Convenția este ca sonda neagră este întotdeauna conectată la portul COM, iar sonda roșie este conectată la unul dintre celelalte porturi în funcție de ceea ce doriți să măsurați.

1.3.1. Porturi

„COM” sau „-” este locul unde trebuie conectată sonda neagră. Sonda COM este convențional neagră.

VΩmA vă permite să măsurați tensiunea, rezistența și continuitatea.

(DCV) Tensiune curentă continuă: Uneori, va fi notată cu un V-. Această setare este utilizată pentru a măsura tensiunea curentului continuu.

(ACV) Tensiunea curentului alternativ: Uneori, va fi notată cu un V ~ în schimb. Această setare este utilizată pentru a măsura tensiunea din sursele de curent alternativ.

Rezistență (Ω): Aceasta măsoară câtă rezistență există în circuit. Cu cât este mai mic numărul, cu atât este mai ușor să circule curentul.

Continuitate: de obicei notat cu un simbol de undă sau diodă. Acest lucru testează pur și simplu dacă un circuit este sau nu complet, trimițând o cantitate foarte mică de curent prin circuit și văzând dacă poate să o recepționeze la celălalt capăt. Dacă nu, atunci există ceva de-a lungul circuitului care cauzează o problemă.

(DCA) Amperaj de curent continuu: similar cu DCV, dar vă va spune amperajul.

(hFE) Colector de curent continuu: Această setare este de a testa tranzistoarele și colectarea de curent continuu,

Așadar, V cu linie dreaptă înseamnă tensiune continuă și V cu linie ondulantă înseamnă tensiune de curent alternativ.

Pentru a măsura tensiunea: Setați modul la V cu o linie ondulantă dacă măsurați tensiunea AC sau V cu linie dreaptă dacă măsurați tensiunea continuă. Asigurați-vă că sonda roșie este conectată la portul corect adică la partea pozitivă a componentei, de unde provine curentul. Conectați sonda COM la cealaltă parte a componentei. Citiți valoarea de pe afișaj. Pentru a măsura tensiunea trebuie să conectați multimetrul în paralel cu componenta pe care doriți să o măsurați. Plasarea multimetrului în paralel înseamnă plasarea fiecărei sonde de-a lungul cablurilor componentei pe care doriți să o măsurați.

Pentru măsurarea curentului trebuie să conectați multimetrul în serie cu circuitul pe care doriți să-l verificați. Pentru a plasa multimetrul în serie, trebuie să plasați sonda roșie pe cablul unei componente și sonda neagră pe următorul conductor. Multimetrul acționează ca și cum ar fi fost un fir în circuitul tău. Dacă deconectați multimetrul, circuitul nu va funcționa.

2. PROBLEME FUNDAMENTALE ÎN MAȘINI ELECTRICE

2.1. Noțiuni introductive

Prin mașina electrică se înțelege un ansamblu de corpuri solide (armături pe care de regula sunt plasate înfășurări conductoare), în general relativ mobile, cuplate între ele electric, magnetic, sau și magnetic și electric; acest ansamblu transformă energia electrică în energie mecanică, situație în care vorbim despre motoare, sau invers, din energie mecanică în energie electrică, situație în care vorbim despre generatoare (Figura 2.1.) sau (în cazul transformatorului spre exemplu din energie electrică tot în energie electrică de altă formă sau parametri).

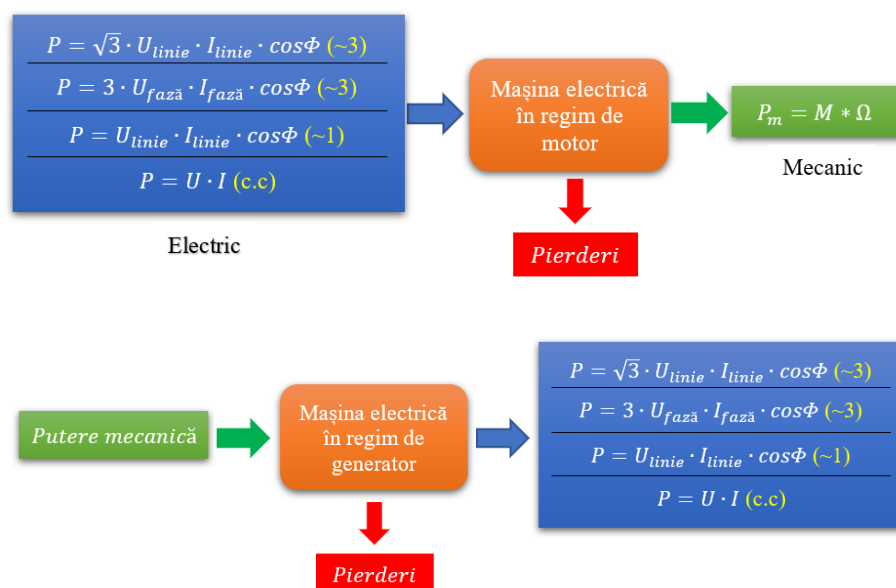


Fig.2.1. Mașina electrică în regim de motor și în regim de generator

2.1.1. Plăcuța de identificare

Orice mașină electrică are o plăcuță de identificare și ea este descrisă în Figura 2.2. și detaliată în rândurile de mai jos.

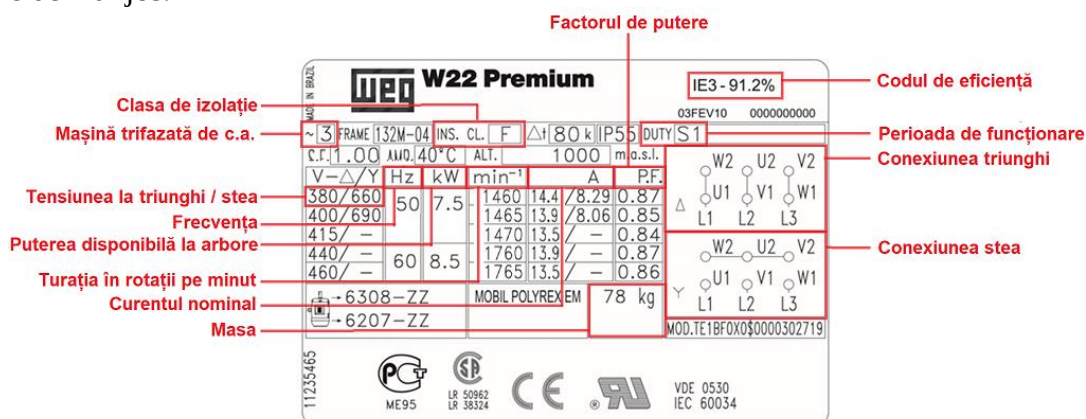


Fig.2.2. Placa de identificare a unei mașini electrice

Codul de eficiență - Mașina electrică va avea o eficiență „nominală” afișată pe placă, aceasta este randamentul mediu. Cu cât această valoare este mai aproape de 100%, cu atât costul consumului de energie electrică va fi mai mic. În exemplul nostru, ni se arată un cod IE3 care indică o eficiență premium. Cele patru niveluri de eficiență a motorului sunt: IE1 – Eficiență standard; IE 2 – Eficiență ridicată; IE 3 – Eficiență Premium; IE 4 – Eficiență Super Premium

Clasa de izolație - Temperatura cea mai ridicată din punctul cel mai fierbinte a mașinii electrice are un impact grav asupra duratei de viață a mașinii. Temperatura care apare în acel loc este o combinație între temperatura de proiectare a mașinii și temperatura ambiantă. Clasa de izolație arată capacitatea mașinii de a rezista la temperaturi în timp. Mașinile au capacități de izolare diferite. Codurile de izolație arată toleranța lor termică sau capacitatea de a supraviețui la o temperatură specificată pentru o perioadă de timp. Cu cât este mai mare litera de cod desemnată, cu atât este mai mare capacitatea de căldură. Se bazează pe cea mai ridicată temperatură la care materialul o poate rezista în mod continuu fără a degrada sau reduce durata de viață a mașinii. IES specifică 5 tipuri diferite de clase de izolație:

- Clasa A – 105°C
- Clasa E – 120°C
- Clasa B – 130°C
- Clasa F – 155°C
- Clasa H – 180°C

Puterea disponibilă la arbore - kW este o expresie a puterii mecanice nominale a mașinii - capacitatea sa de a furniza cuplul necesar pentru sarcină la viteza nominală.

Frecvența - Aceasta arată frecvența electrică de intrare la care este proiectată să funcționeze mașina. De obicei, pentru mașini, frecvența de intrare este de 50 sau 60 Hz. Dacă pe plăcuța de identificare este marcată mai mult de o frecvență (ca exemplul nostru), atunci și alți parametri care vor diferi la frecvențe de intrare diferite trebuie să fie indicați și pe plăcuța de identificare.

Turația în rotații pe minut (rot/min) – este viteza la sarcină completă adică viteza la care cuplul nominal la sarcină maximă este furnizat la puterea nominală de ieșire, această viteză fiind uneori numită viteză de alunecare sau viteza reală a rotorului. În exemplul de plăcuță de identificare din figura de mai sus, acesta este declarat ca min-1, dar în general este declarat în rot/min; aceste măsurători sunt aceleași.

Curentul nominal - Aceasta corespunde puterii nominale de ieșire împreună cu tensiunea și frecvența. Curentul se poate abate de la amperii de pe plăcuța de identificare dacă fazele sunt dezechilibrate sau dacă tensiunea se dovedește a fi mai mică decât cea indicată.

Factorul de putere - Factorul de putere este indicat pe plăcuța de identificare ca „PF” sau „F.P” sau „cos ϕ ”. Factorul de putere este o expresie a raportului dintre puterea activă (W) și puterea aparentă (VA) exprimată ca procent

2.1.2. Tipurile de conexiune

Într-un sistem electric trifazat, sunt utilizate în principal două tipuri de conexiuni:

- 1 - Conexiune Stea
- 2 - Conexiune Triunghi (Delta).

Pentru conexiunea stea în sistemul trifazat, toate firele de trei faze sunt conectate la un punct comun. Acest punct comun este cunoscut ca punct neutru (nul). Conexiunea stea va fi numită un sistem trifazat cu trei fire atunci când sunt utilizate doar trei fire. Și va fi numită un sistem trifazat cu patru fire atunci când sunt utilizate toate cele trei faze și firul neutru.

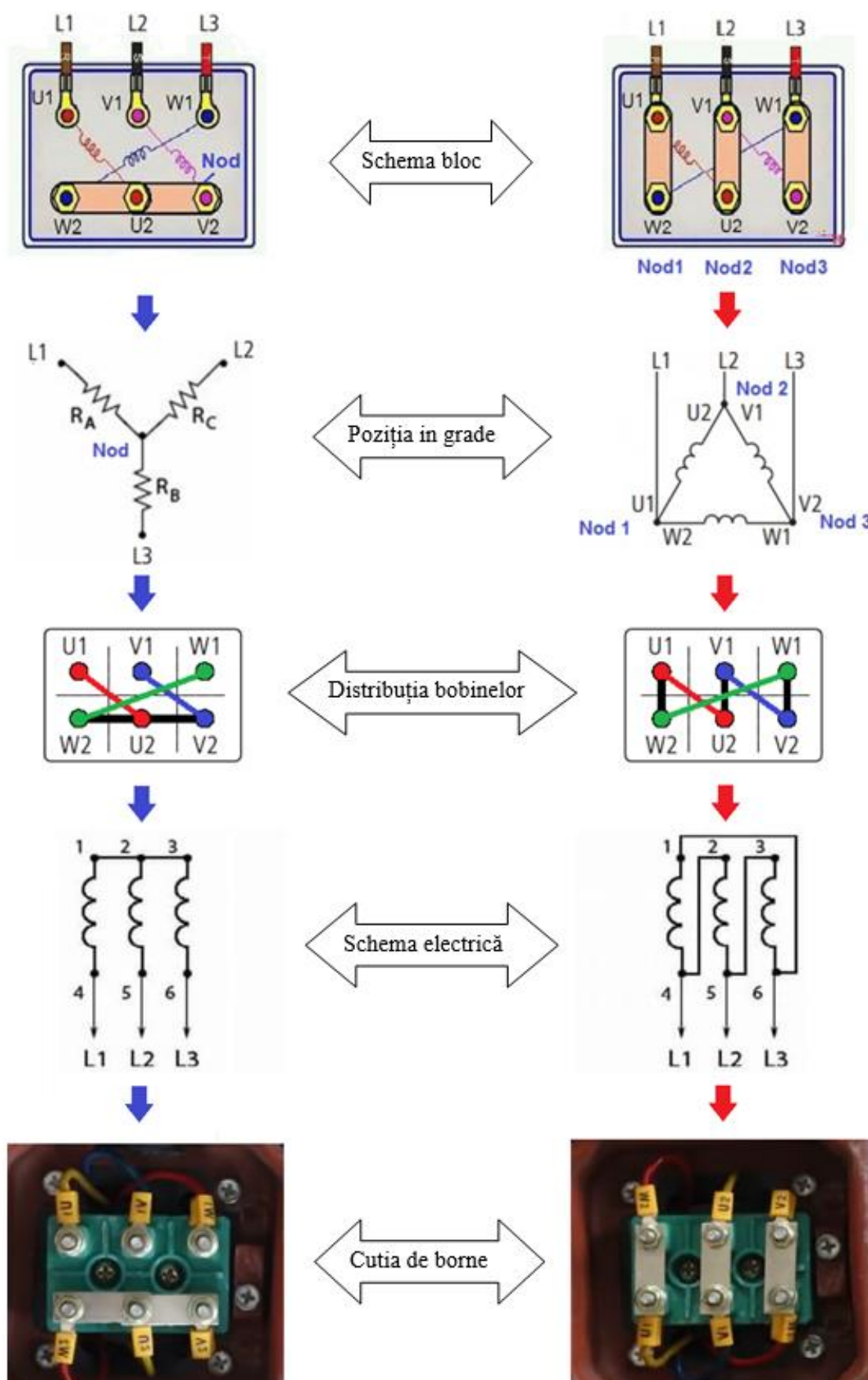


Fig.2.3. Conexiunile stea și triunghi

Firul neutru este conectat la punctul neutru unde sunt conectate toate cele trei faze. Întrucât conexiunea stea arată ca litera „Y”, este cunoscută și sub numele de conexiune în Y. Pentru conexiunea în triunghi este necesar să unim capetele bobinelor. Diferența dintre cele două este reprezentată în Figura 2.3. și 2.4.

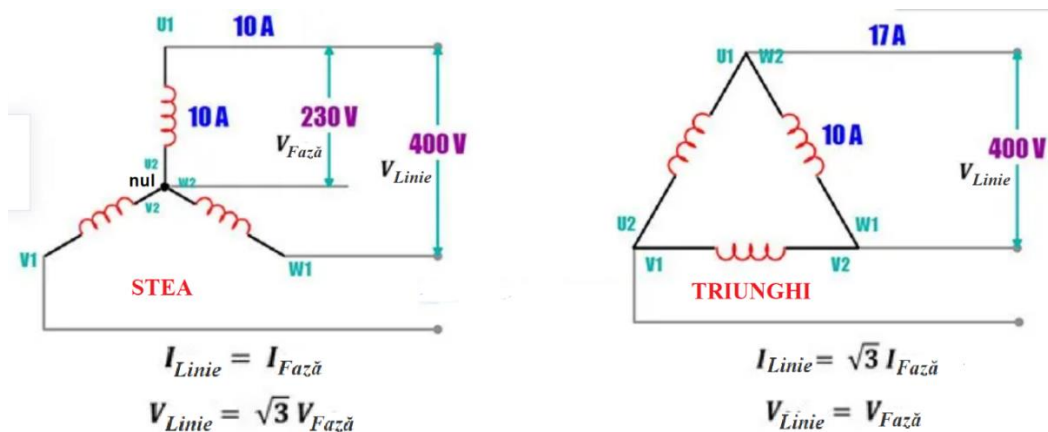


Fig.2.4. Diferența dintre conexiunile stea și triunghi la parametrii electrici de fază și de linie

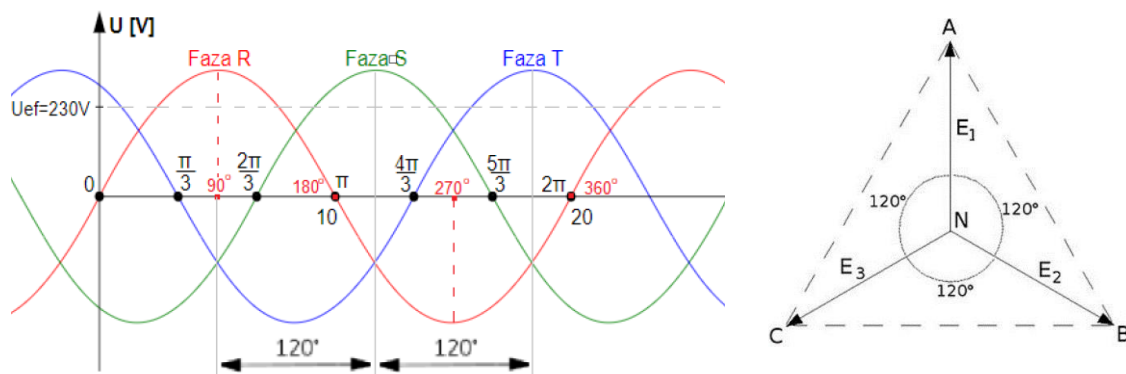


Fig.2.5. Sistemul trifazat de tensiuni

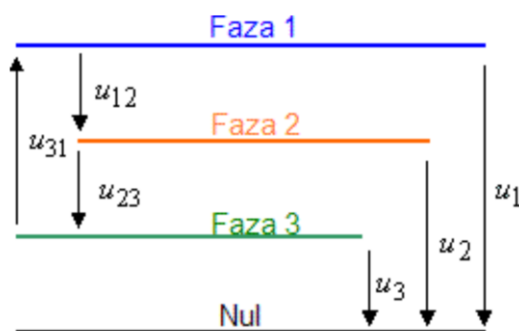


Fig.2.6. Reprezentarea tensiunilor de fază și de linie ale unui sistem trifazat

Tensiunile u_1, u_2 și u_3 , sunt tensiuni de fază, iar tensiunile u_{12}, u_{23} și u_{13} , sunt tensiuni de linie; primele au valoarea eficace $U_{ef} = 230V$, celelalte au valoarea eficace $\sqrt{3} \cdot U_{ef} = 400V$

2.1.3. Triunghiul puterilor

Relatia dintre cele trei tipuri de putere, reala, reactiva si aparenta, poate fi exprimata sub forma trigonometrica. Aceasta exprimare este cunoscuta sub numele de „triunghiul puterilor”. Folosind teorema lui Pitagora, putem afla lungimea oricarei laturi a triunghiului dreptunghic, latura ce reprezinta de fapt puterea respectiva, daca stim „lungimile” celorlalte doua laturi, sau o lungime si unghiul de faza din circuit.

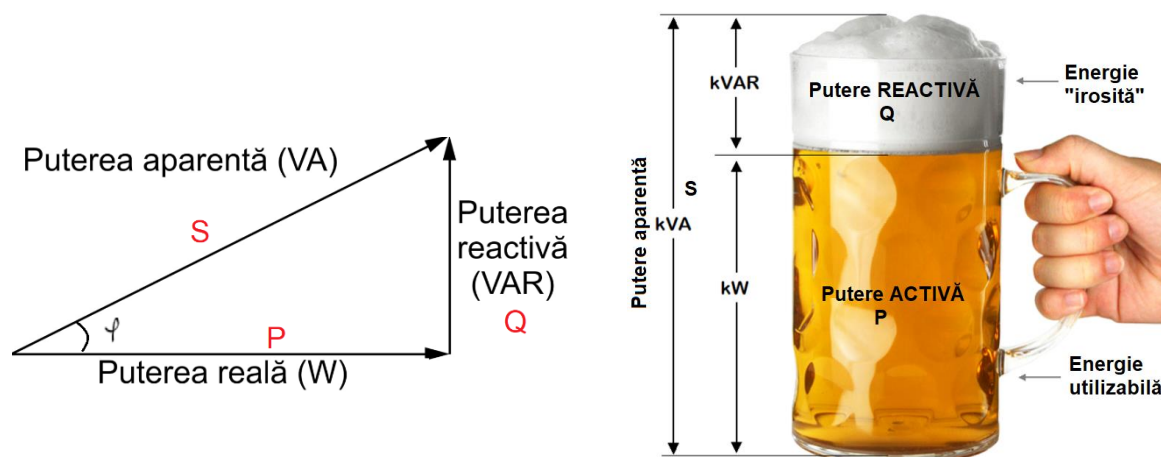


Fig.2.7. Triunghiul puterilor

Putere, energie	Putere activa	$P = UI \cos(\varphi) \text{ [W]}$
	Putere reactiva	$Q = UI \sin(\varphi) \text{ [VAr]}$
	Putere aparenta	$S = UI \text{ [VA]}$
	Energia activa	$W_a = Pt = UI \cos(\varphi)t \text{ [Ws]}$
	Energia reactiva	$W_r = Qt = UI \sin(\varphi)t \text{ [VArs]}$
	Energia aparenta	$W = St = UI t \text{ [VAs]}$
	Factorul de putere	$\cos(\varphi) = P / S$

2.2. Clasificarea mașinilor electrice

Avand in vedere natura curentului ce strabate infasurarile, masinile electrice sunt de c.c. si de c.a. In grupa masinilor de c.a. sunt cuprinse in principal masinile **asincrone** si **sincrone**. Tot in aceasta grupa, conventional se includ si **transformatoarele**;

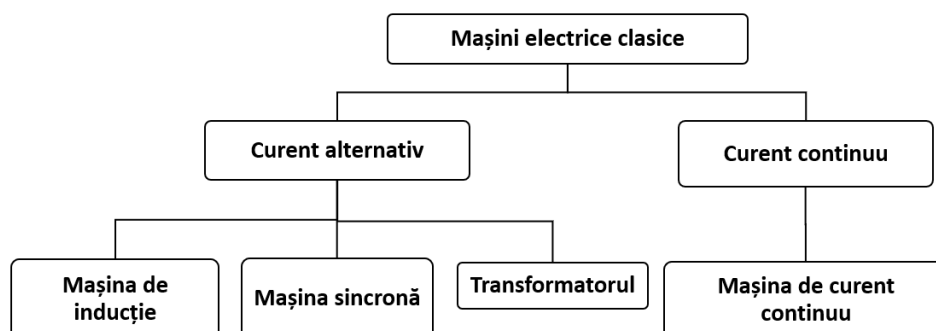


Fig.2.8. Clasificarea mașinilor clasice în funcție de tipul de alimentare

Maschinele electrice mai pot fi clasificate după diferite criterii și anume:

- potrivit regimului de funcționare ele se împart în: **generatoare, motoare, convertizoare, amplificatoare, regulatoare** s.a.;
- după procedeul de răcire, mașinile sunt cu ventilație naturală și forțată (cu ventilator);
- în funcție de gradul de protecție (IP00-IP68), mașinile electrice se separă în următoarele grupe mai importante:
 - a) **deschise** nu au dispozitive de protecție a părților în rotație sau conductoare de curenți;
 - b) **închise** nu au orificii-deschizături (în această grupă sunt incluse și mașinile protejate ermetic, care nu lasă să treacă umezeala la cufundarea lor completă în apă);
 - c) **protejate** au dispozitive pentru protecția mașinii împotriva pătrunderii corpurilor străine, picăturilor de apă s.a.;
 - d) **antiexplozive**
- având în vedere forma de mișcare a părții lor mobile, mașinile electrice se divid în **rotative** și **liniare** (cu mișcare progresivă). De obicei în industrie se aplică în principal mașini electrice rotative;
- în funcție de puterea nominală mașinile electrice se împart în următoarele grupe:
 - micromășini – până la 0,5 kW;
 - mașini de putere mică – de la 0,5 kW până la 20 kW;
 - mașini de putere medie – de la 20 kW până la 250 kW;
 - mașini de putere mare – peste 250 kW.
- din punct de vedere al fenomenelor electromagnetice
 - inductor (armătura pe care se află înfășurarea de excitație)
 - indus
- din punct de vedere cinematic
 - parte fixă (stator)
 - parte mobilă (rotor)
- din punct de vedere funcțional
 - circuit magnetic
 - circuit electric
 - circuit mecanic și de răcire

2.3. Circuitele mașinilor electrice

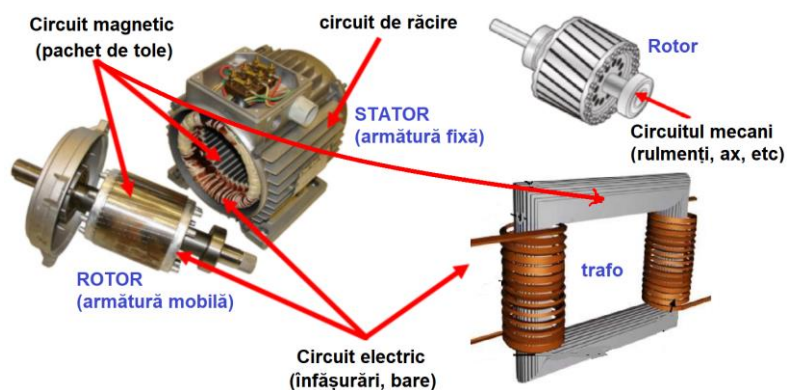


Fig.2.9. Circuitele mașinilor electrice

2.3.1. Circuitul magnetic (miez magnetic)

Suportul material al fluxului magnetic îl constituie circuitul magnetic al mașinii. El se compune în general din aer și fier. În cazul mașinilor care funcționează în curent alternativ, pentru limitarea pierderilor (datorate curenților turbionali sau efectului de histerezis) circuitul magnetic se poate construi din tole realizate din oțel aliat cu Siliciu.

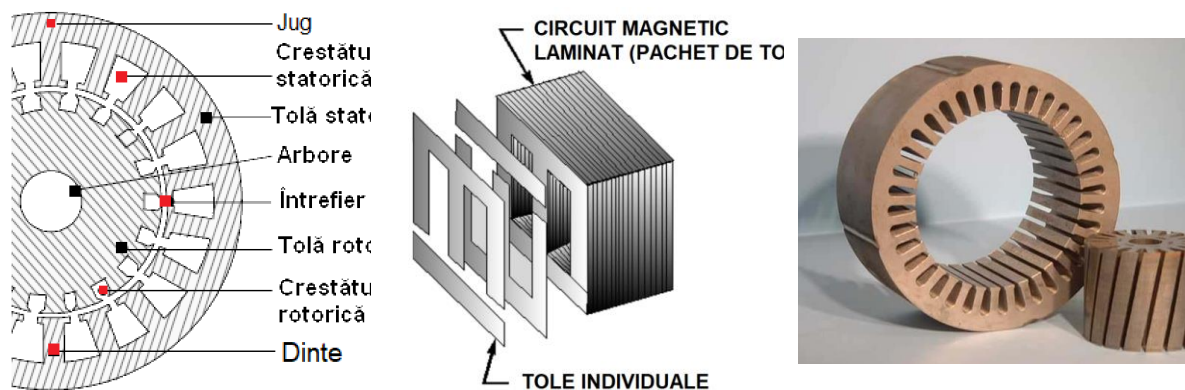


Fig.2.10. Circuitul magnetic (miez magnetic)

Între vectorul intensității câmpului magnetic (H) și vectorul inducției magnetice (B), pentru medii izotrope, există o relație de proporționalitate, factorul de proporționalitate fiind permeabilitatea mediului respectiv μ_r (caracteristica de magnetizare - porțiunea liniară).

Din punct de vedere al permeabilității, materialele se împart în trei grupe :

- Materiale magnetice, care au $\mu_r < \mu_0$;
- Materiale paramagnetice, care au $\mu_r > \mu_0$;
- Materiale feromagnetice, care au $\mu_r \gg \mu_0$, unde μ_0 este permeabilitatea vidului.

Cel mai mult interesează evident materialele feromagnetice, deoarece la intensități mici ale câmpului magnetic se pot obține inducții mari. Acest lucru permite reducerea volumului materialelor active și a energiei utilizate pentru producerea solenației și deci reducerea costurilor și cheltuielilor de exploatare ale mașinii. Trebuie menționat faptul că permeabilitatea materialelor feromagnetice nu este constantă, ci depinde de valoarea intensității câmpului magnetic. De asemenea, proprietățile feromagnetice dispar peste o anumită temperatură (punct Curie), care în general este peste 200°C, temperatură care însă nu este atinsă în funcționarea normală a mașinilor electrice.

Câmpurile magnetice pot fi produse de curenții ce parcurg înfășurările sau de magneți permanenți.

Tipuri de câmpuri magnetice în mașinile electrice:

- fixe în spațiu
 - constant în timp
 - variabil în timp – alternativ sau pulsatoriu
- mobile în spațiu - învârtitoare

Câmpurile mobile (învârtitoare) se obțin din cele fixe fie pe cale mecanică, fie pe cale electrică. Pentru a pune în evidență un câmp magnetic se urmărește interacțiunea între acesta și un alt câmp magnetic sau un obiect realizat din material feromagnetic.

2.3.2. Circuitul electric (înfășurările)

În sens larg, prin bobina se înțelege un element de circuit format dintr-un conductor electric astfel înfășurat, încât se formează una sau mai multe spire. O spira are două conductoare active: unul de ducere și unul de întoarcere, raportat la sensul curentului prin spira. Ca forme obișnuite, întâlnim bobine cilindrice, paralelipipedice sau toroidale. Materialele din care se execută bobinele se aleg în funcție de tensiunea de lucru, solicitările electrice, termice, mecanice sau de altă natură, din timpul funcționării. Materialele utilizate se pot împărți în: materiale electroconductoare, materiale electroizolante, materiale auxiliare. Materialele electroconductoare se folosesc pentru realizarea înfășurărilor propriu-zise, a legăturilor flexibile de ieșire, precum și pentru fabricarea elementelor de racord (borne, cleme). Cel mai mult sunt folosite cuprul și alumiul, datorită proprietăților electrice și mecanice ale acestora. Menționăm că tehnologia cuprului depinde de gradul de ecruisare al acestuia. Deosebim în acest sens trei variante: cuprul moale (m), cuprul semitare (2/2 t) și cuprul tare (t). Alumiul este mai puțin utilizat decât cuprul, din cauza problemelor pe care le ridică lipirea sa. Rezistivitatea electrică mai ridică în comparație cu cuprul impune mărirea secțiunii conductoarelor și aceasta conduce la soluții constructive necorespunzătoare pentru unele produse electrotehnice, dintre care menționăm mașinile electrice rotative. Alumiul este utilizat cu precădere pentru realizarea bobinelor la transformatoarele electrice de putere mare. La unele mașini electrice de putere mare se mai utilizează bare din aliaje de cupru. Inductia proprie a bobinei L depinde de dimensiunile acesteia de numărul de spire și de materialul miezului magnetic. Inductia proprie a bobinei se mai poate calcula în funcție de fluxul magnetic și de curentul care străbate bobina. Conductoarele pentru bobine pot avea secțiunea circulară sau dreptunghiulară (patrată) și pot fi izolate sau neizolate. Bobinele pot fi realizate cu spirale dispuse la un loc și atunci se numesc bobine concentrate, sau cu spirale dispuse în cresațiunile miezului magnetic, și atunci se numesc bobine repartizate.



Bobine din cupru distribuite în cresațiuni



Bare de alumiul



Bobine din cupru concentrate pe poli

Fig.2.11. Circuitul electric

Din punct de vedere chimic, materialele trebuie să fie cât mai pure, utilizându-se pentru bobinaje numai cuprul electrolitic al cărui simbol este CuE. În mod normal nu se folosește secțiunea conductorului obținută direct din calcul, ci se adoptă o « secțiune normalizată » pe baza unor standarde. Dar, cum conductorul se folosește izolat, trebuie să se știe pentru dimensionarea cresaăturilor, care este grosimea izolației acestuia. Ea depinde de felul materialului izolat, precum și de diametrul nominal al conductorului. Astăzi se utilizează cel

mai mult emailurile superioare, de clasa E, B și F, care s-au impus prin proprietățile lor de stabilitate termică și un preț de cost avantajos.

2.3.3. Circuitul mecanic și de răcire

Reprezintă acele componente ale mașinii electrice care nu fac parte din circuitul electric sau magnetic. Din această categorie fac parte: carcasa mașinii, lagărele, ventilatorul de răcire, etc. În funcție de tipul mașinii și regimul de funcționare al acesteia răcirea se realizează natural sau forțat.

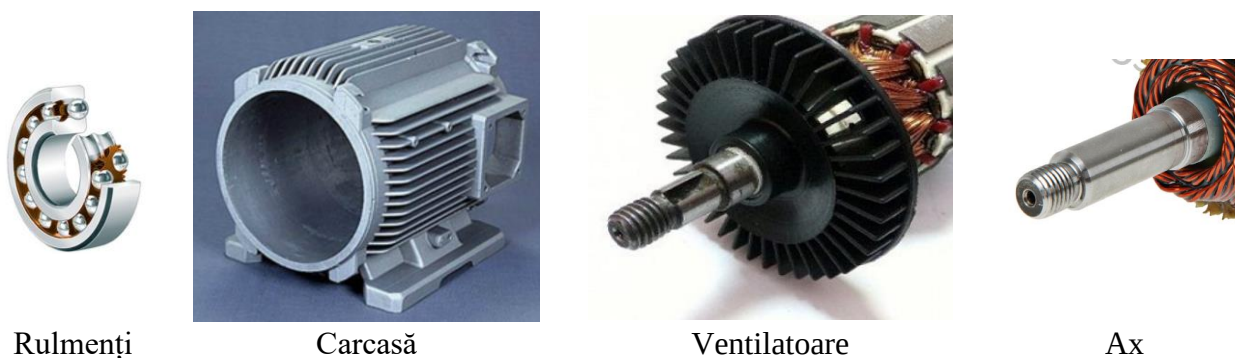


Fig.2.12. Circuitul mecanic

2.4. Legea inducției electromagnetice

Fenomenul de inducție electromagnetică constă în apariția unei tensiuni electromotoare induse și a unui curent indus într-un circuit străbătut de un flux magnetic variabil în timp. Un experiment simplu care ilustrează fenomenul este prezentat în Figura 2.12. Avem o bobină la bornele căreia legăm un miliampermetru formând un circuit închis. Aducem în vecinătatea acestui circuit un magnet. Dacă magnetul este în repaus ampermetrul nu indică nici un curent. Dacă magnetul este deplasat înainte și înapoi între spirele bobinei acul ampermetrului deviază indicând prezența în circuitul bobinei a unui curent numit curent indus care indică faptul că acest sistem (bobină+magnet) se comportă ca un generator electric, tensiunea electromotoare care apare numindu-se tensiune electromotoare indusă.

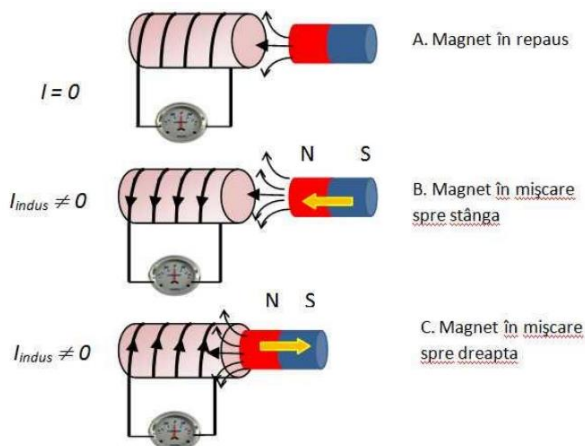


Fig.2.13. Fenomenul de inducție electromagnetică

Regula lui Lenz Sensul curentului indus este legat de mișcarea magnetului și de modul în care sunt orientați polii magnetului față de bobină. Regula care stabilește sensul curentului

indus și a tensiunii electromotoare induse se numește regula lui Lenz și se enunță astfel : tensiunea electromotoare indusă și curentul indus au un astfel de sens încât să se opună variației câmpului magnetic inductor (care este cauza fenomenului). Modul de aplicare a regulii lui Lenz pentru experimental descris în Figura 2.13. este ilustrat mai jos. În Figura 2.14. magnetul intră cu polul N între spirele bobinei . Câmpul magnetic inductor $B_{inductor}$ este orientat spre stânga și determină un flux crescător prin bobină. Conform regulii lui Lenz câmpul magnetic indus B_{indus} trebuie să determine un flux care să se opună acestei creștei adică să fie în sens opus lui $B_{inductor}$. Prin urmare curent indus prin bobină trebuie să aibe un astfel de sens încât să determine B_{indus} care să se opună creșterii lui $B_{inductor}$. Modul de asociere a sensului curentului în bobină cu inducția câmpului magnetic generat de acesta este dat de regula mâinii drepte.

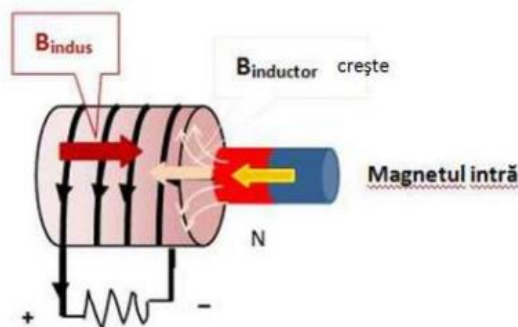


Fig.2.14. Regula lui Lenz

Legea lui Faraday este o relație matematică care exprimă valoarea tensiunii electromotoare induse într-un circuit electric ca urmare a variației fluxului magnetic în respectivul circuit și anume:

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (2.1)$$

unde $\mathcal{E}$ este tensiunea electromotoare (EMF) și Φ_B este fluxul magnetic. Sensul forței electromotoare este dat de legea lui Lenz. Mărimile fizice care măsoară modul de comportare al circuitelor electrice de diferite tipuri din punctul de vedere al fluxului magnetic generat la creșterea sau descreșterea curentului electric se numește inductanță:

$$L = \frac{d\Phi}{di} \quad (H- Henry) \quad (2.2)$$

Un calcul simplu arată că inductanța unei bobine cu N spire se calculează conform relației:

$$L = \mu_0 \mu_r \frac{N^2 S}{l} \quad (2.3)$$

Unde $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} N/A^2$ este permeabilitatea absolută a vidului , μ_r este permeabilitatea relativă a miezului magnetic al bobinei , N numărul de spire , S aria unei spire , l lungimea bobinei .

2.5. Pierderi in masini electrice

În mașinile electrice avem 3 tipuri de circuite așa cum am specificat mai sus și toate circuitele au pierderi. Circuitele magnetice au pierderi de histereză și curenți turbionari, Circuitele electrice au pierderi electrice si evident, circuitele mecanice au pierderi mecanice datorita frecărilor cu aerul sau a rulmenților.

2.5.1. Pierderi în circuitele magnetice (pierderi în Fier).

În mașinile electrice sunt porțiuni ale circuitului magnetic care sunt parcurse de un flux constant în timp și altele care sunt parcurse de un flux variabil. Având în vedere acest lucru s-a urmărit utilizarea unor materiale adecvate, cu o permeabilitate cât mai mare, dar și cu proprietăți care să limiteze pierderile de energie (prin histerezis și curenți turbionari) în porțiunile de circuit în care fluxul este variabil. În porțiunile de miez cu flux constant se utilizează, în mod obișnuit, oțel-carbon sub formă de foi (laminat), oțel și fontă turnate sau oțel forjat.

În porțiunile de miez magnetic, unde fluxul magnetic este variabil, interesează valoarea pierderilor prin histerezis și curenți turbionari. Având în vedere că aceste pierderi se transformă în căldură, care limitează solicitările electromagnetice va trebui ca în aceste porțiuni să se folosească materiale cu compoziții și calități diferite de cele ale materialelor amintite mai înainte (pentru porțiunile de circuit magnetic prin care fluxul magnetic este constant). Miezul magnetic va fi realizat din tole.

Mărimea pierderilor depinde de aria ciclului de histerezis, dar trebuie precizat că o influență importantă o au tensiunile interne și direcția de orientare a cristalelor. Procedeu de a obține un material feromagnetic cu pierderi mici este de a adăuga în oțelul obișnuit un anumit procentaj de siliciu. Prin acesta se obține un material cu ciclu de histerezis redus și deci o scădere a pierderilor prin histerezis. Totodată se obține și o majorare a rezistenței electrice a materialului, ceea ce duce și la reducerea pierderilor prin curenți turbionari. Trebuie amintit însă că adăugarea de siliciu conduce la o micșorare a permeabilității magnetice.

S-a constatat că direcția de laminare are o importanță deosebită și că pe această direcție materialul are o permeabilitate maximă. Prin laminarea la rece, s-au obținut materiale cu proprietăți magnetice superioare, materiale ce sunt utilizate astăzi în construcția miezurilor magnetice ale mașinilor rotative. În procesul de magnetizare a materialelor feromagnetice histerezisul se manifestă prin „rămânerea în urmă” a densității fluxului magnetic (mărime notată cu B) față de intensitatea cîmpului magnetic aplicat din exterior, H . Graficul alăturat arată cele două mărimi, măsurate într-un experiment de magnetizare în cîmp magnetic oscilant. Se observă că atunci cînd cîmpul magnetic scade pînă la zero, fluxul magnetic în oțel are o valoare nenulă, notată B_R ; acest fenomen se numește *remanență magnetică*. Pentru a anula acest flux remanent trebuie aplicat un cîmp magnetic invers, de o valoare notată în grafic cu H_C (Figura 2.15), cîmpul magnetic coercitiv. Au aplicații importante atît materialele cu un histerezis mare cît și cele cu unul foarte mic. De exemplu magneții permanenți au proprietatea de a rămîne magnetizați tocmai datorită histerezisului. În absența acestuia materialul ar reveni la fluxul magnetic zero imediat ce s-ar înlătura cîmpul magnetic exterior, deci nu ar avea proprietățile care îl caracterizează. În același fel, peliculele magnetice folosite pentru înregistrări audio, video și de date (casete audio, benzi de magnetofon, dischete de calculator, hard-discuri, cărți de credit etc.) se bazează pe fenomenul de remanență magnetică — deci pe histerezis — pentru a memora cîmpul magnetic aplicat la înregistrare. În sistemele de calcul vechi celulele de memorie funcționau pe același principiu al histerezisului magnetic. În schimb, aplicațiile care cer conservarea energiei necesită un efect histerezis cît mai slab. De exemplu un transformator electric al cărui miez magnetic are histerezis va avea pierderi de energie (manifestate prin încălzirea miezului) cu atît mai mari cu cît remanența magnetică și cîmpul coercitiv sînt mai mari. Pentru a minimiza acest efect se folosesc materiale speciale, ca de exemplu aliajul de nichel și fier (uneori și molibden) numit Permalloy.

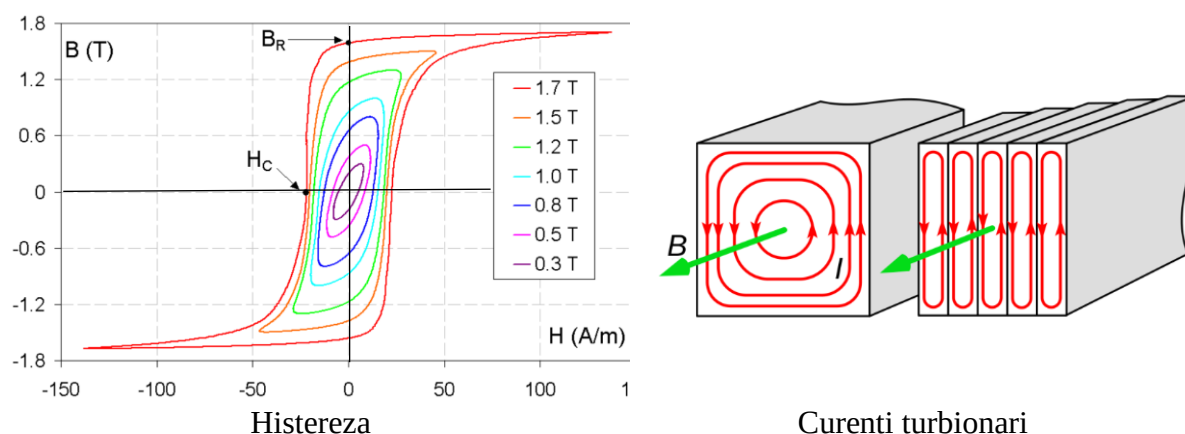


Fig.2.15. Pierderi în circuitele magnetice

Curenții turbionari apar datorită inducției electromagnetice deoarece orice material conductor aflat într-un câmp magnetic variabil în timp, în el se vor induce tensiuni electromotoare. Cum tolele sunt într-un circuit închis, tensiunea electromotoare tinde către zero și cresc curenții foarte mult. Asta este motivul pentru care circuitul magnetic se realizează din tole tocmai pentru a reduce cât de mult cu putință curenții turbionari.

2.5.2. Pierderi electrice și mecanice

O parte din puterea electromagnetică, și anume:

$$P_{Cu} = m \cdot R \cdot I^2 \quad (2.4)$$

se consuma pentru acoperirea pierderilor în înfășurări, unde R este rezistența unei faze, m este numărul de faze, iar I este curentul ce trece prin conductoarele rotorice.

Puterea mecanică utilă P_2 se obține, dacă din puterea mecanică totală P_m se scad pierderile mecanice de frecare în lagare, pierderile mecanice de contact la inele, pierderile de ventilație, precum și pierderile suplimentare.

2.6. Aplicații

2.6.1. Experiment 1

Pentru a demonstra influența pe care o are un câmp magnetic variabil în timp asupra unor componente, se vor pune două tevi în poziție verticală (una din cupru și cealaltă din plastic) care au o lungime de aproximativ un metru și prin aceste tevi se vor introduce simultan 2 magneți în așa fel încât aceștia din urmă să fie în cădere liberă spre sol. Magneții să aibe aceeași dimensiune și forță de atracție. În urma acestui experiment, răspundeți la întrebările de mai jos.

Cum reacționează magnetul cu țeava din cupru dacă le apropiați ?
Cum reacționează magnetul cu țeava din plastic dacă le apropiați ?
Prin ce țeavă magnetul ajunge mai repede la sol ?
Care este explicația pentru care magneții nu ies din țeavă în același timp ?

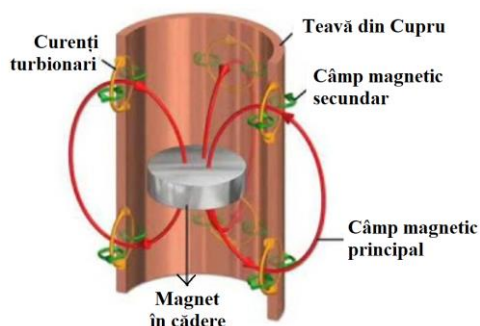


Fig.2.16. Experimentul cu teava din cupru

2.6.2. Experiment 2

O mașină de inducție este formată dintr-un stator și rotor dar pentru acest experiment se va lua doar statorul și se va realiza montajul din schema de mai jos:

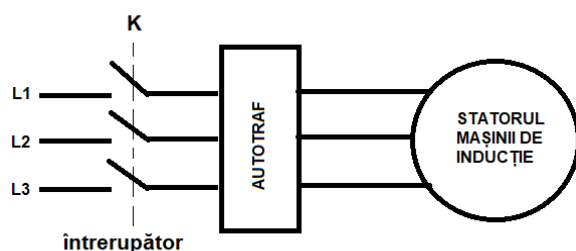


Fig.2.16. Experimentul cu bila

Un recipient dielectric (plastic sau carton presat) este introdus în interiorul statorului și mersul lucrării este acesta:

- Se va crește tensiunea până la 50 de volți din autotransformator și se va menține timp de un minut după care din autotransformator tensiunea va fi adusă înapoi la zero.
- Se va introduce în același recipient o bilă metalică și se va repeta procedeul cu creșterea și descreșterea tensiunii cu un nivel maxim de 50volți.

Cum a reacționat recipientul din plastic la creșterea tensiunii din autotransformator ?	
Explicați de ce reacționează bila metalică odată cu creșterea tensiunii de alimentare ?	

2.6.3. Identificarea elementelor constructive ale mașinilor electrice

Pe baza materialului didactic existent în laborator studenții vor identifica, pentru diferite mașini electrice, cele trei elemente constructive ale mașinilor electrice (magnetic, electric și mecanic). În tabelul 2.1. se vor nota tipul mașinii electrice, tipul elementului analizat și observații asupra acestuia.

Tabelul 2.1.

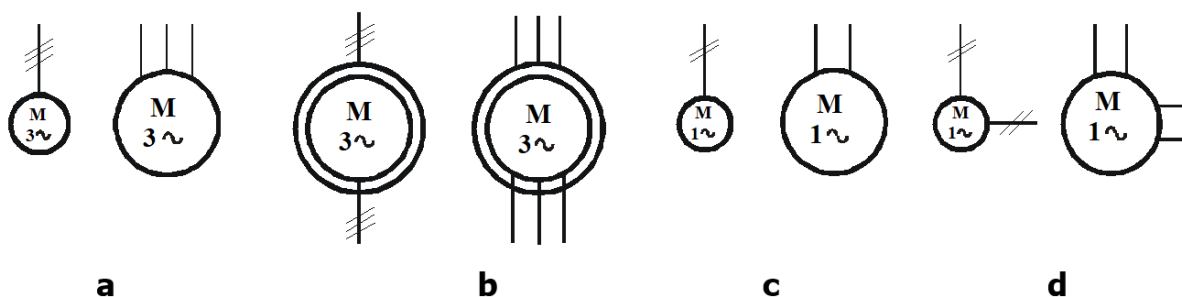
Elementul analizat	constructiv	Tipul de circuit din care face parte (mecanic, electric sau magnetic)	Observații

2.6.4. Probleme

Problema 1 - O sarcină inductivă trifazată este alimentată cu o tensiune de linie de 400V și curentul de fază este de 10A. Cât este puterea electrică absorbită dacă avem un factor de putere de 0.8 ?

Problema 2 – Cât este cuplul generat la arborele unei mașini care are o viteză de rotație de 1450 rot/min dacă avem alimentarea de la un sistem monofazat de tensiuni, curentul nominal este de 10A, factorul de putere de 0,8 și randamentul de 80% ?

Problema 3 - Identificați semnele convenționale din figura de mai jos.



3. MAȘINA DE CURENT CONTINUU

3.1. Încercările mașinii de curent continuu cu excitație derivație

Se pornește motorul de curent continuu (MCC) cu excitație derivație, alimentat la tensiune nominală, cu reostatul de pornire R_p la valoare maximă și cel de câmp R_c la valoare minimă. După pornire se reduce treptat valoarea reostatului de pornire până la scurtcircuitare. Cu reostatul de câmp se aduce MCC la turație nominală. Sarcina mașinii de curent continuu este reprezentată de un generator sincron debitând pe o sarcină rezistivă/inductivă variabilă. Curentul de sarcină al mașinii de curent continuu se modifică deci prin modificarea sarcinii.

Ω

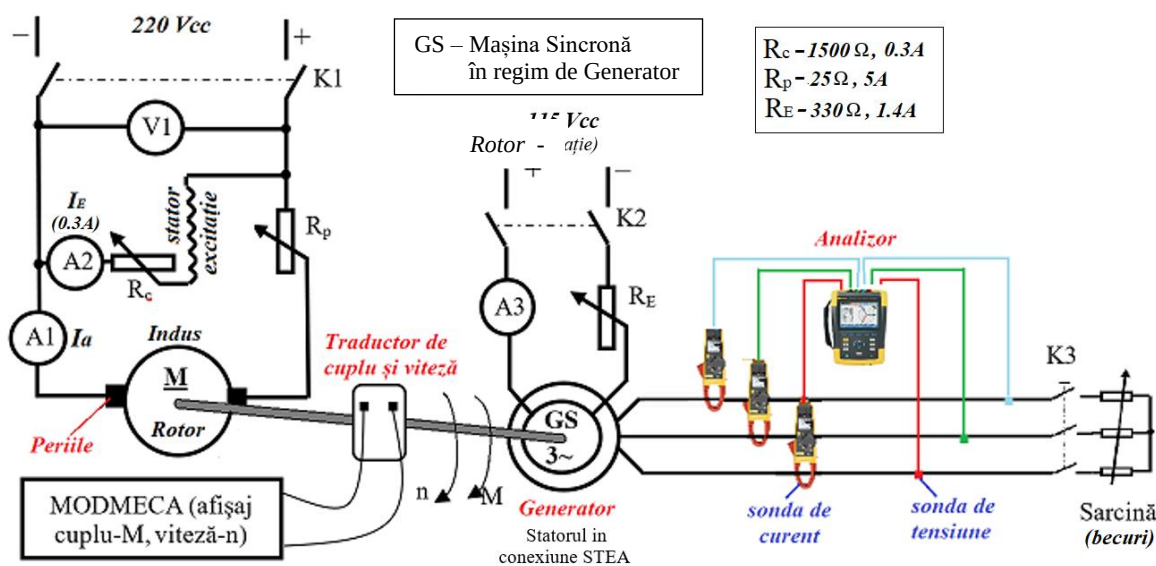


Fig. 3.1. Montaj experimental: încercările motorului de curent continuu cu excitație derivație.

3.1.1. Caracteristica naturală a motorului de curent continuu cu excitație derivație

Pentru ridicarea caracteristicii naturale a motorului de curent continuu cu excitație derivație, la tensiune de alimentare nominală și curent de excitație nominal, se modifică sarcina de la 0 (corespunzător mersului în gol) la valoarea maximă. Se completează Tabelul 3.1. cu rezultatele măsurătorilor.

3.1.2. Caracteristicile artificiale ale motorului de curent continuu cu excitație derivație

Cele trei caracteristici artificiale ale mașinii de curent continuu cu excitație derivație se obțin astfel:

- MCC are rotorul în mișcare la turație nominală. Se reduce tensiunea de alimentare a mașinii, păstrând curentul de excitație la valoarea nominală (turația se va reduce). Pentru tensiune de alimentare și curent de excitație constante, se modifică sarcina pe aceleași trepte ca și la caracteristica naturală. Rezultatele măsurătorilor se trec în Tabelul 3.1.
- Se revine cu tensiunea de alimentare la valoarea nominală și se reduce curentul de excitație sub valoarea nominală. Pentru tensiune de alimentare și curent de excitație constante, se modifică sarcina pe aceleași trepte ca și la caracteristica naturală. Rezultatele măsurătorilor se trec în Tabelul 3.1.

- c. La tensiune de alimentare nominală se revine la curent de excitație nominal și se introduce în circuit o parte din reostatul de pornire. Pentru tensiune de alimentare și curent de excitație constante, se modifică sarcina pe aceleași trepte ca și la caracteristica naturală. Rezultatele măsurătorilor se trec în Tabelul 3.1.

Puterea utilă a motorului rezultă din expresia:

$$P_2 = M \cdot \Omega = M \cdot \frac{\pi \cdot n}{30} \quad (3.1)$$

Puterea absorbită de motor este dată de relația:

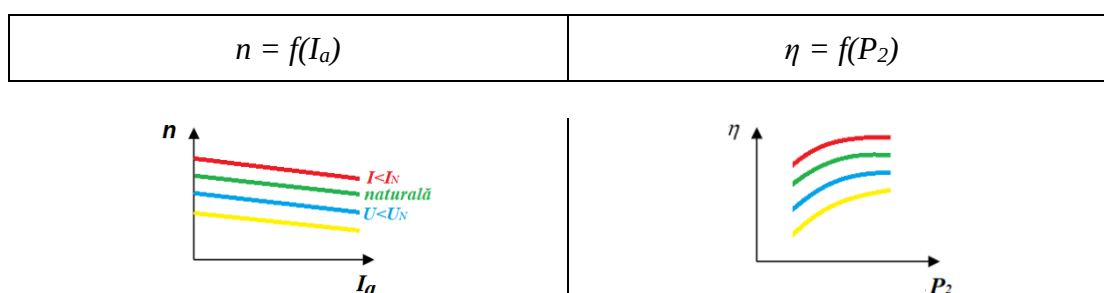
$$P_1 = U \cdot (I_a + I_E) \quad (3.2)$$

Deci randamentul mașinii se obține din ecuația:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \quad (3.3)$$

Rezultatele calculelor se trec de asemenea în Tabelul 3.1. Cu datele măsurate și calculate se ridică cele 4 caracteristici (una naturală și trei artificiale), pe același grafic, respectiv cele 4 caracteristici ale randamentului pe un al doilea grafic. Pentru măsuratori se va schimba pe rând tensiunea, curentul și rezistența.

3.1.3. Determinarea experimentală a caracteristicilor de sarcină, naturală și artificiale



3.2. Încercările motorului de curent continuu cu excitație serie

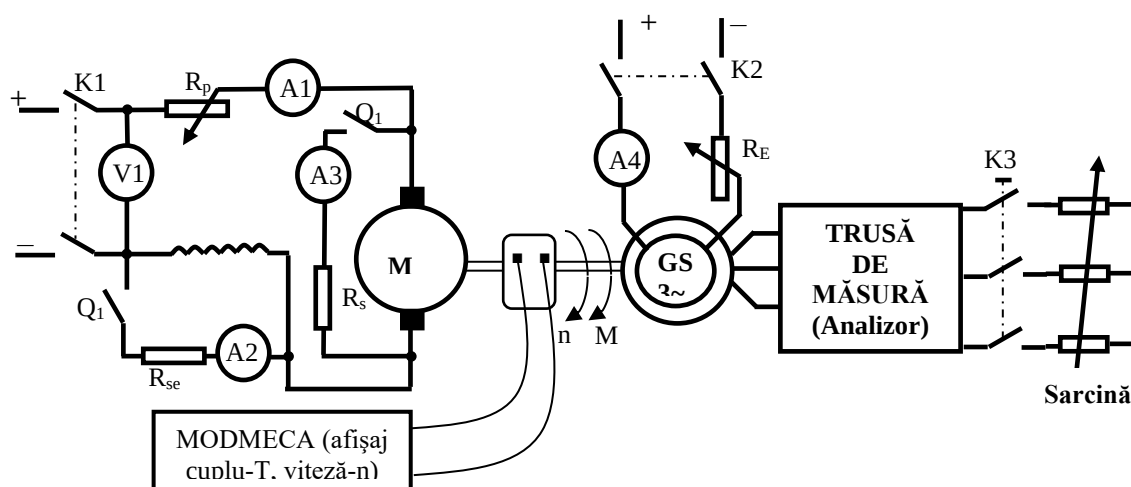


Fig. 3.2. Montaj experimental: încercările motorului de curent continuu cu excitație serie.

Tabelul 3.1.

Mărimi măsurate						Mărimi calculate			
U[V]	R _p [Ω]	I _E [A]	I _a [A]	M [Nm]	n [rot/min]	Ω [rad/sec]	P ₁ [W]	P ₂ [W]	η [%]
Caracteristica naturală									
220	0	0.3							
Caracteristica artificială									
200	0	0,3							
220	0	0,25							
220	15	0,3							

4. TRANSFORMATORUL ELECTRIC

4.1. Notiuni introductive

Este o mașină electrică care transformă energia electrică de anumiți parametri (tensiune și curent) în energie electrică de alți parametri. Transformatorul funcționează pe principiul inducției electromagnetice. Aceasta înseamnă că el funcționează **doar în curent alternativ**. În cadrul transformării se păstrează aceeași frecvență a tensiunii și a curentului.

În esență, un transformator constă dintr-un miez de fier pe care sunt plasate două înfășurări izolate una față de alta și față de miezul de fier. Înfășurarea care primește energia de la o sursă - regim de receptor - se numește înfășurare (bobinaj) primară; cea de-a doua înfășurare, aflată în regim de generator, furnizează energia unei rețele sau consumator, numindu-se înfășurare (bobinaj) secundară. Miezul magnetic al transformatorului reprezintă sistemul magnetic al mașinii. Înfășurările constituie sistemul său electric. Cele două bobinaje între care are loc transferul de putere au în general un număr diferit de spire. Componentele puterii – tensiunea și curentul – suferă prin transformare schimbări inverse: creșterea tensiunii presupune scăderea curentului și invers.

Mărimile care se referă la înfășurarea primară se numesc primare și se notează cu indicele 1. Toate cele care privesc bobinajul secundar sunt notate cu indicele 2. Datele tehnice nominale ale unui transformator se referă la: numărul de faze m_f , puterea aparentă S_N [kVA], tensiunea primară U_1 [kV], tensiunea secundară U_2 [kV], frecvența f [Hz], schema de conexiune *stea*, *triunghi* sau *zigzag*. Raportul dintre tensiunea primară și cea secundară poartă numele de **raport de transformare** k_T .

$$k_T = \frac{U_{f1}}{U_{f2}} \quad (4.1)$$

Randamentul este dat de:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100 \quad (4.2)$$

unde P_2 absorbită de consumator în secundar, iar P_1 puterea consumată de primar de la rețea. După destinația lor, transformatoarele se împart în două mari clase: de putere și speciale. După numărul de faze transformatoarele (denumite prescurtat trafo) pot fi monofazate sau polifazate (de obicei trifazate). În categoria transformatoarelor speciale intră: autotransformatoarele – transformă tensiunea în limite reduse, reglatoarele de inducție – servesc la reglarea tensiunii în rețelele de distribuție, transformatoarele de măsură (de curent și de tensiune), transformatoare de fază – odată cu tensiunea schimbă și numărul de faze ale distribuției, transformatoarele cu destinație specială (de sudură, cu reglajul tensiunii sub sarcină, cele de mare intensitate etc.).

Studiul fenomenelor la transformatoare se face pentru o singură fază dat fiind faptul că la toate transformatoarele polifazate ele sunt aceleași pe orice fază.

4.2. Regimurile de limită de funcționare

Regimurile de limită de funcționare a transformatorului sunt mersul în gol și în scurtcircuit.

4.2.1. Regimul de mers în gol

Mersul în gol corespunde situației în care transformatorul este conectat cu primarul la rețea, circuitul său secundar fiind deschis ($Z \rightarrow \infty$ sau $I_2 = 0$). Din datele obținute la încercarea de mers în gol a transformatorului electric se pot determina:

1. raportul de transformare k_T ,
2. curentul de mers în gol (în procente),
3. parametrii schemei echivalente
4. factorul de putere la mers în gol.

4.2.2. Regimul de scurtcircuit

Un transformator electric este în regim de scurtcircuit când bornele secundarului sunt cuplate galvanic între ele printr-o impedanță de valoare nulă ($Z = 0$). În acest caz avem $U_2 = 0$. În practică regimul de scurtcircuit al transformatorului interesează în două variante:

- **Scurtcircuitul de avarie** – transformatorul este alimentat în primar cu tensiunea nominală. Curenții care se stabilesc prin înfășurări depășesc de câteva ori curenții nominali.
- **Scurtcircuitul de probă** – transformatorul este alimentat în primar cu tensiunea de scurtcircuit care este acea valoare redusă a tensiunii pentru care în înfășurări se stabilesc curenții nominali.

Din datele obținute la încercarea de mers în scurtcircuit a transformatorului electric se pot determina:

1. tensiunea de scurtcircuit (în procente)
2. parametrii schemei echivalente
3. factorul de putere la mers în scurtcircuit.

4.3. Legarea în paralel

Două sau mai multe transformatoare funcționează în paralel atunci când sunt alimentate, simultan, de la aceeași rețea primară și debitează pe aceeași rețea secundară. Pentru asigurarea regimului optim de funcționare este necesar ca transformatoarele care funcționează în paralel să îndeplinească următoarele condiții:

1. Tensiunile lor primare, respectiv secundare, să fie egale, ceea ce implică, în limita toleranțelor admise, condiția ca rapoartele de transformare să fie egale.
2. Transformatoarele să aparțină aceleiași grupe de conexiuni, adică unghiul dintre tensiunile de linie primară și secundară (care este întotdeauna multiplu de 30°) să fie același.
3. Tensiunile de scurtcircuit ale transformatoarelor să fie egale.

De asemenea, se recomandă ca puterile nominale ale transformatoarelor să nu difere mult între ele.

4.4. Încercările transformatorului electric monofazat

4.4.1. Scopul lucrării

1. Calculul raportului de transformare, a pierderilor în fier și în înfășurări, al factorului de putere la mersul în gol, respectiv în scurtcircuit.
2. Determinarea parametrilor schemei echivalente.
3. Trasarea caracteristicilor de funcționare la mers în gol: pierderi în fier, curent și factor de putere funcție de tensiunea primară.

4.4.2. Scheme de montaj și modul de lucru

A. Regimul de mers în gol

Pentru determinarea *caracteristicilor* la mersul în gol se realizează schema din Figura 4.1. Din autotransformatorul AT se variază tensiunea primară între 0 și $1.2 \cdot U_N$ și se măsoară:

- Tensiunea secundară la mers în gol (U_{20})
- Curentul primar la mers în gol (I_{10})
- Puterea absorbită de transformator la mers în gol (P_{10})
- Rezistența primarului la mers în gol (R_{10})

Măsurătorile se trec în Tabelul 4.1. Cu aceste valori se determină:

1. Raportul de transformare (k_T)
2. Pierderile în fier (P_{Fe})
3. Parametrii schemei echivalente de mers în gol
4. Factorul de putere la mers în gol ($\cos(\varphi_0)$)

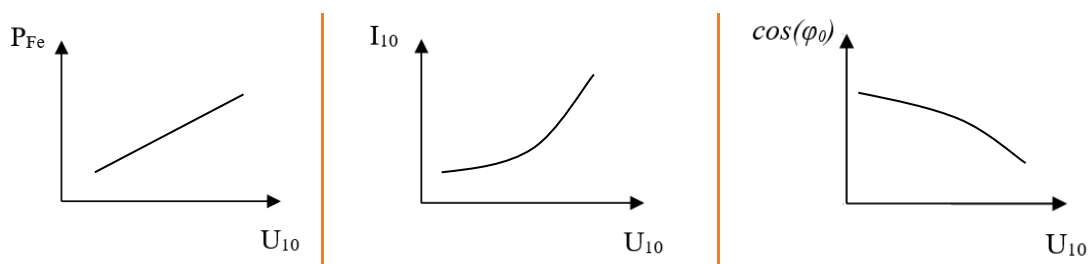
Valorile calculate utilizând relațiile date mai jos se completează de asemenea în

Tabelul 4.1.

Raportul de transformare	Rezistența la mers în gol	Impedanța la mers în gol	Reactanța la mers în gol	Pierderile în fier	Factorul de putere
$k_T = \frac{U_{10}}{U_{20}}$	$R_{10} = \frac{P_{10}}{I_{10}^2}$	$Z_{10} = \frac{U_{10}}{I_{10}}$	$X_{10} = \sqrt{Z_{10}^2 - R_{10}^2}$	$p_{Fe} = P_{10} - R_{10}I_{10}^2$	$\cos \phi_0 = \frac{P_{10}}{U_{10}I_{10}}$

Se ridică apoi cu datele din tabel caracteristicile următoare:

$P_{Fe} = f(U_{10})$	$I_{10} = f(U_{10})$	$\cos(\varphi_0) = f(U_{10})$
----------------------	----------------------	-------------------------------



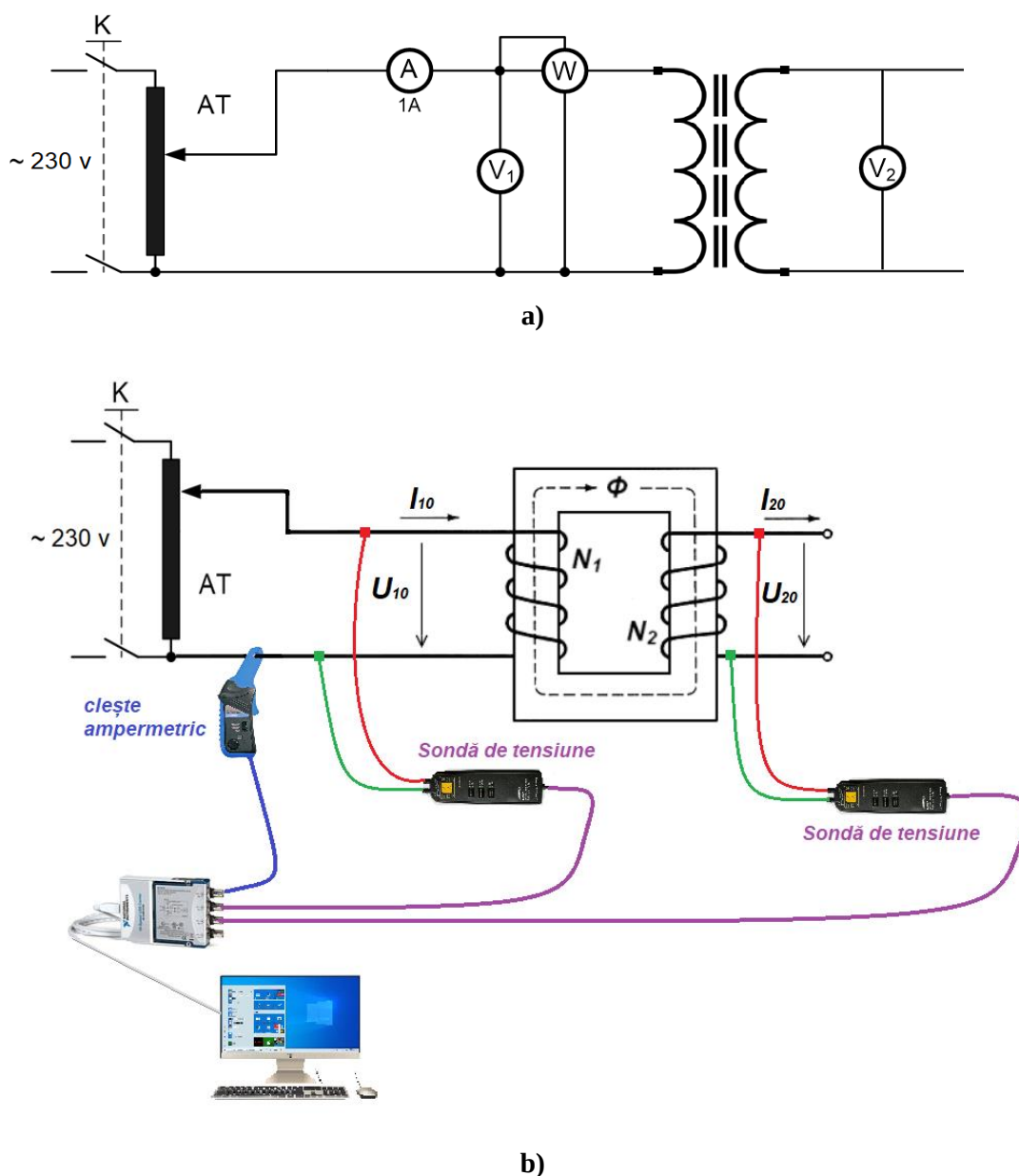


Fig. 4.1. Schema electrică pentru încercarea la mers în gol: a) cu aparate de măsură clasice, b) cu sisteme de achiziție

A. Regimul de scurtcircuit

Se cuplează, conform Figurii 4.2, secundarul transformatorului în scurtcircuit și se alimentează primarul, pornind de la zero, cu tensiunea nominală de scurtcircuit (acea valoare redusă pentru care în primar și în secundar se obțin valorile nominale ale curenților). Măsurătorile se trec în Tabelul 4.3 și se măsoară:

- Tensiunea primară de scurtcircuit (U_{1sc})
- Tensiunea primară nominală (U_{1N})
- Curentul în primar de scurtcircuit (I_{1sc})
- Puterea absorbită din rețea de către transformator (P_{1sc})

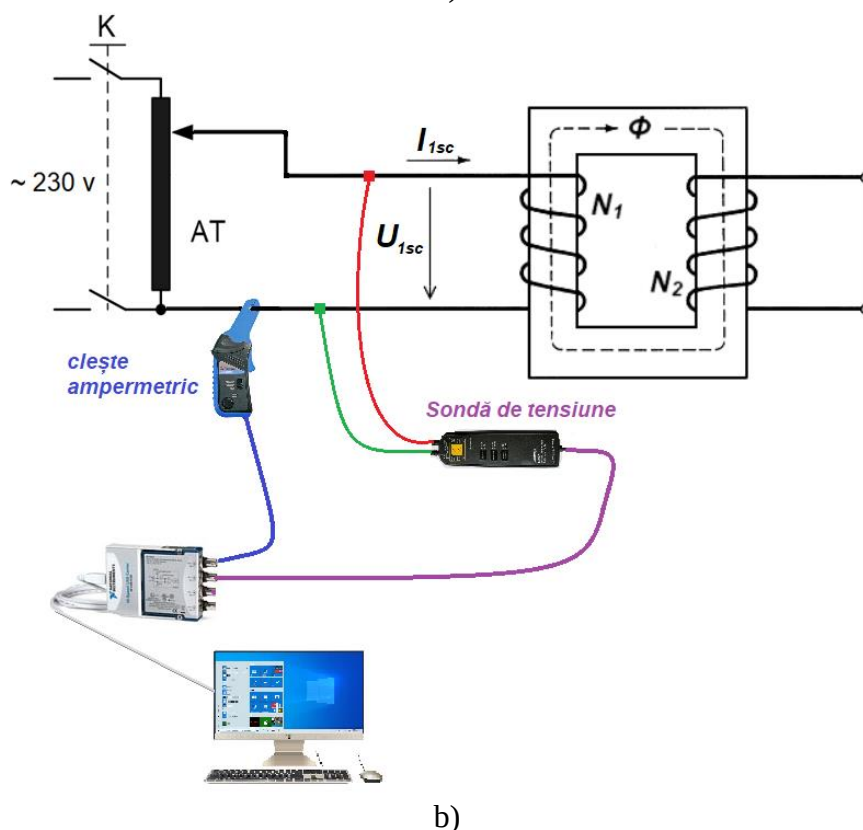
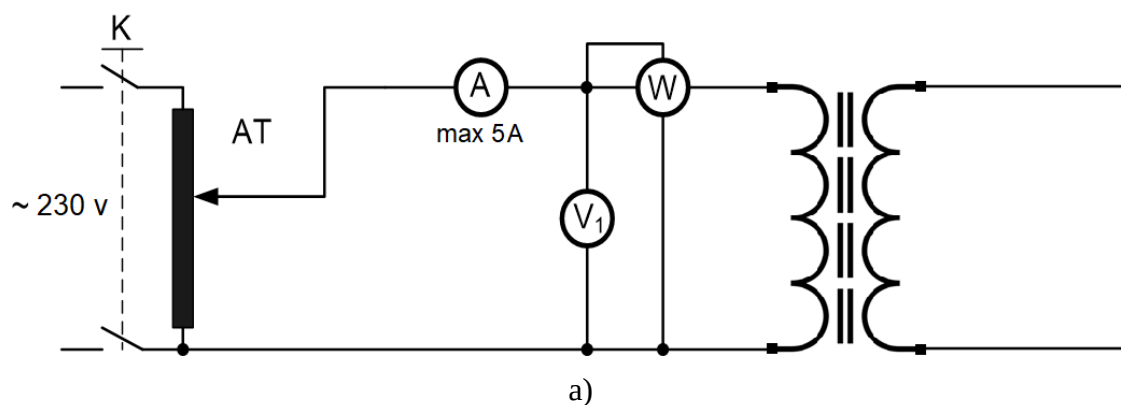


Fig. 4.2. Schema electrică pentru încercarea la scurtcircuit: a) cu aparate de măsură clasice, b) cu sisteme de achiziție

Cu aceste valori se determină *parametrii schemei echivalente de mers în scurtcircuit, factorul de putere și componentele activă și reactivă ale tensiunii nominale de scurtcircuit* utilizând relațiile:

Rezistența	Impedanța la scurtcircuit	Reactanța la scurtcircuit	Factorul de putere la scurtcircuit	Componenta activă	Componenta reactivă
$R_{1sc} = \frac{P_{1sc}}{I_{1sc}^2}$	$Z_{1sc} = \frac{U_{1sc}}{I_{1sc}}$	$X_{1sc} = \sqrt{Z_{1sc}^2 - R_{1sc}^2}$	$\cos \phi_{sc} = \frac{P_{1sc}}{U_{1sc} I_{1sc}}$	$u_{sca} = \frac{I_{1sc} R_{sc}}{U_{1N}} 100$	$u_{scr} = \frac{I_{1sc} X_{sc}}{U_{1N}} 100$

Datele obținute se trec în Tabelul 4.3.

C. Determinarea parametrilor schemei echivalente și a parametrilor transformatorului monofazat

Schemele echivalente la mersul în gol, respectiv în scurtcircuit, sunt prezentate în Figura 4.3. Din schema echivalentă a transformatorului monofazat la mersul în gol se poate scrie:

$$\begin{aligned} R_0 &= R_1 + R_m \\ X_0 &= X_{1\sigma} + X_m \end{aligned} \quad (4.3)$$

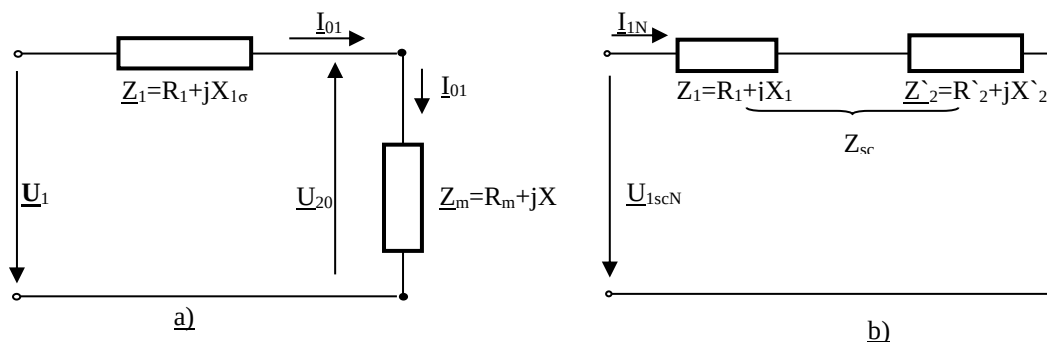


Fig. 4.3. Scheme electrice echivalente ale transformatorului electric monofazat la la mersul în gol (a) și la scurtcircuit (b)

Rezistența înfășurării secundare rezultă:

$$R_2 = \frac{1}{k^2} (R_{sc} - R_1) \quad (4.4)$$

Reactanțele de scăpări se pot determina cu aproximație:

$$X_{1\sigma} = X'_{2\sigma} = \frac{X_{sc}}{2} \quad (4.5)$$

Reactanța de magnetizare rezultă:

$$X_m = X_0 - X_{1\sigma} \quad (4.6)$$

Cu parametrii schemei echivalente determinați se poate trece la calculul parametrilor transformatorului monofazat, și anume:

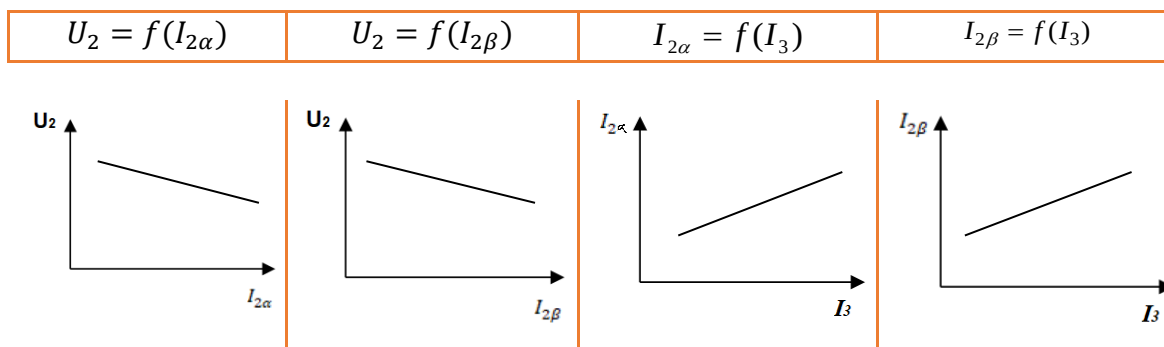
$$\begin{aligned} L_{1\sigma} &= \frac{X_{1\sigma}}{\omega} & L_{2\sigma} &= \frac{1}{k^2} \frac{X'_{2\sigma}}{\omega} \\ L_{11h} &= \frac{X_m}{\omega} & L_{12} = L_{21} &= \frac{L_{11h}}{k} & L_{22h} &= \frac{L_{11h}}{k^2} \end{aligned} \quad (4.7)$$

Rezultatele obținute în urma calculelor se vor trece în Tabelul 4.4.

4.5. Funcționarea în paralel a transformatoarelor

4.5.1. Scopul lucrării

1. Verificarea condițiilor de cuplare în paralel a doua transformatoare: raportul de transformare și grupa de conexiuni.
2. Determinarea caracteristicilor externe ale celor două transformatoare legate în paralel și a distribuției sarcinii pe fiecare din cele două transformatoare legate în paralel respectiv:



4.5.2. Scheme de montaj si modul de lucru

Pentru ca două transformatoare sau mai multe sa poată fi cuplate și să poată funcționa în paralel este necesar ca tensiunile secundare pe fazele omoloage legate la aceeași bară să fie în orice moment egale și în fază. Aceasta condiție este îndeplinită dacă:

- Rapoartele de transformare la borne sunt egale,
- Transformatoarele aparțin aceleiași grupe de conexiuni
- Transformatoarele au aceeași tensiune de scurtcircuit.

Cu montajul din Figura 4.4 se verifică condițiile obligatorii de cuplare în în paralel a celor două transformatoare: T_α și T_β . Pentru aceasta se scurtcircuitează bornele omoloage din primarul și secundarul unui transformator (α și β) și se măsoară cele trei tensiuni: U_{AB} , U_{ab} și U_{Bb} . Cu valorile obținute se determina raportul de transformare K (1) și grupa de conexiuni Y(2) pentru fiecare transformator în parte.

$$K_T = \frac{U_{AB}}{U_{ab}} \quad (4.8)$$

$$Y = \frac{\arccos \frac{U_{AB}^2 + U_{ab}^2 - U_{Bb}^2}{2 \cdot U_{Ab} \cdot U_{ab}}}{\pi / 6} \quad (4.9)$$

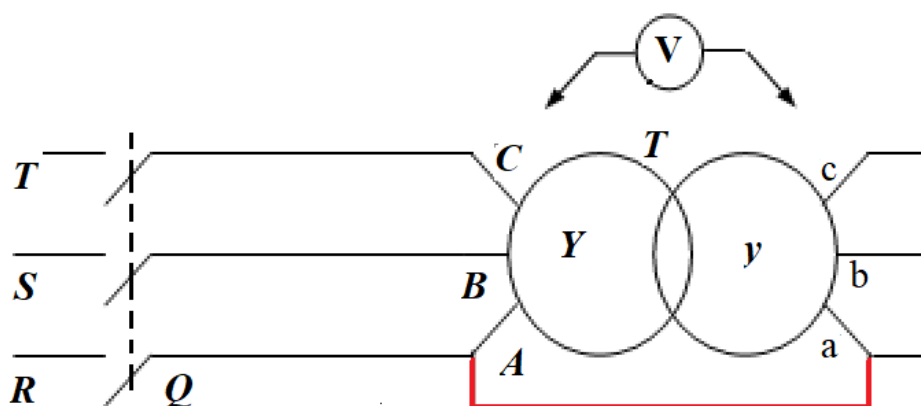


Fig. 4.4. Montajul utilizat pentru calculul raportului de transformare și a grupeii de conexiuni a unui transformator trifazat

Pentru legarea celor două transformatoare la sarcină se realizează montajul din Figura 4.5.

1. Secundarele celor două transformatoare sunt legate la întrerupătorul manual Q_p care este pe poziția deschis.
2. Cu ajutorul unui voltmetru se verifică ca tensiunile între bornele omoloage ale transformatoarelor să fie nule.
3. Dacă voltmetrul indică valoarea zero, se închide întrerupătorul Q_p , iar transformatoarele sunt puse în paralel.
4. Pentru cuplarea lor în sarcină se închide ulterior întrerupătorul manual Q_3 .

Pentru diferite valori ale sarcinii, se măsoară și se notează curentul din secundarele transformatoarelor, curentul de sarcină, I_3 , și tensiunea U_2 în Tabelul 4.6. Cu ajutorul acestor valori se reprezintă pe același grafic caracteristicile externe ale celor două transformatoare. Dacă transformatoarele au puteri nominale diferite, este indicat ca transformatorul cu putere mai mică să aibă o tensiune de scurtcircuit mai mare, astfel el va rămâne subîncărcat când transformatorul de putere mai mare a ajuns la sarcină nominală. În concluzie, în astfel de cazuri, puterea grupului este cu puțin mai mică decât suma puterilor celor două transformatoare.

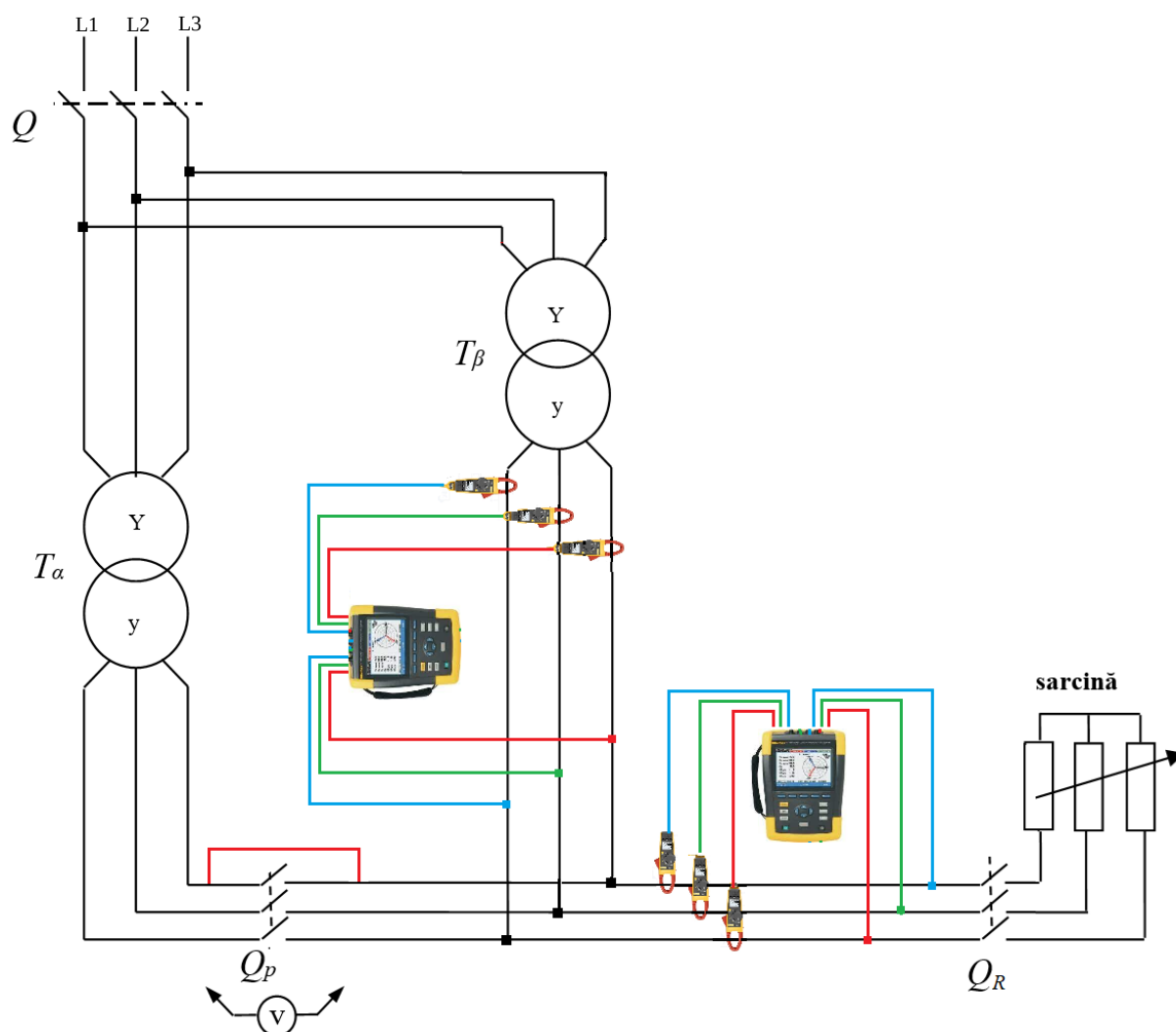


Fig. 4.5. Schema de cuplare în paralel a două transformatoare

4.6. Interpretarea rezultatelor și concluzii

Tabelul 4.1 Marimi utilizate pentru determinarea caracteristicilor la mers în gol

Mărimi măsurate					Mărimi calculate	
$U_{10}[\text{V}]$	$I_{10}[\text{A}]$	$R_{10}[\Omega]$	$P_{10}[\text{W}]$	$U_{20}[\text{V}]$	$P_{Fe}[\text{W}]$	$\cos\phi_0$
50						
100						
130						
150						
170						
190						
210						
230						
250						

Tabelul 4.2. Marimi utilizate pentru determinarea caracteristicilor la mers în gol

$U_{10N}[\text{V}]$	$I_{10}[\text{A}]$	$P_{10}[\text{W}]$	$Z_{10}[\Omega]$	$R_{10}[\Omega]$	$X_{10}[\Omega]$	$\cos\phi_0$	k
230							

Tabelul 4.3. Marimi utilizate pentru determinarea caracteristicilor la mers scurtcircuit

$U_{1sc}[\text{V}]$	$I_{1sc}[\text{A}]$	$P_{1sc}[\text{W}]$	$Z_{sc}[\Omega]$	$R_{1sc}[\Omega]$	$X_{sc}[\Omega]$	$\cos\phi_{sc}$	$u_{sca}[\%]$	$u_{scr}[\%]$

Tabelul 4.4 Parametrii schemei echivalente

$R_1[\Omega]$	$R_2[\Omega]$	$R_m[\Omega]$	$L_{1\sigma}[\text{H}]$	$L_{2\sigma}[\text{H}]$	$L_{11}[\text{H}]$	$L_{22}[\text{H}]$	$L_{12}[\text{H}]$

Tabelul 4.5 Calculul raportului de transformare și a grupei de conexiuni

	Mărimi măsurate			Mărimi calculate	
	U_{AB}	U_{ab}	U_{Bb}	K_T	γ
T_α					
T_β					

Tabelul 4.6 Calculul mărimilor pentru legarea transformatoarelor în paralel

$U_2[\text{V}]$	$I_{2\alpha}[\text{A}]$	$I_{2\beta}[\text{A}]$	$I_3[\text{A}]$

5. MAȘINA DE INDUCȚIE (ASINCRONĂ)

5.1. Noțiuni introductive

Mașina de inducție trifazată (sau mașina asincronă trifazată) este cea mai folosită în acționările electrice de puteri medii și mari, în regim de motor. Din punct de vedere constructiv, așa cum se poate observa și în Figura 5.1, mașina de inducție este formată din:

- **Stator**, având rolul inductorului, realizat din tole în care sunt ștanțate creștăturile în interiorul cărora este introdus bobinajul trifazat;

- **Rotor**, cu rol de indus, fiind realizat tot din tole ștanțate, în creștăturile acestora putându-se regăsi bare de aluminiu (mașină de inducție cu rotor în colivie) sau un bobinaj trifazat ale cărui capete sunt conectate prin interiorul axului la 3 inele colectoare (Figura 5.2). Accesul la inele dinspre cutia de borne se realizează prin intermediul a 3 perii.

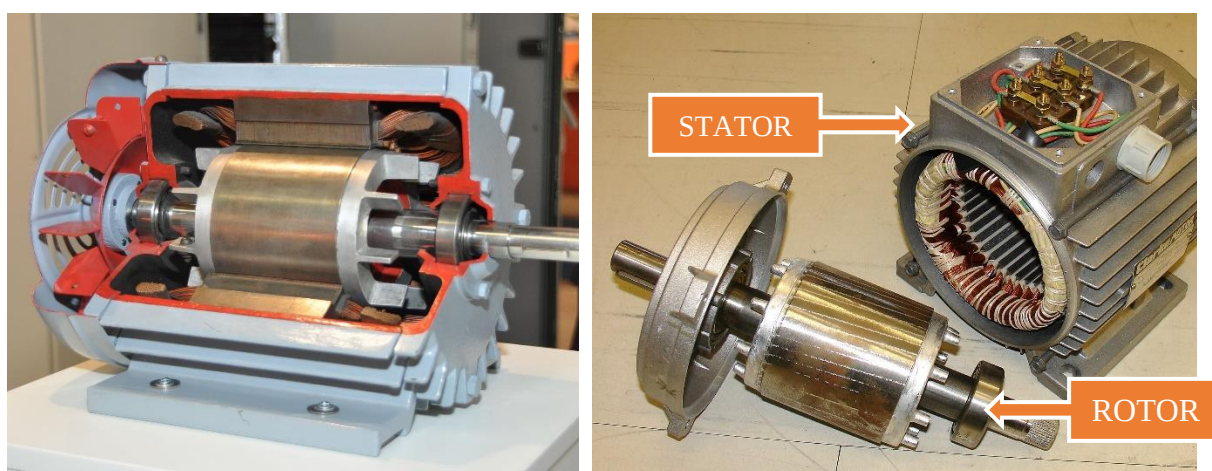


Fig. 5.1. Mașina de inducție cu rotor în colivie (scurtcircuit)

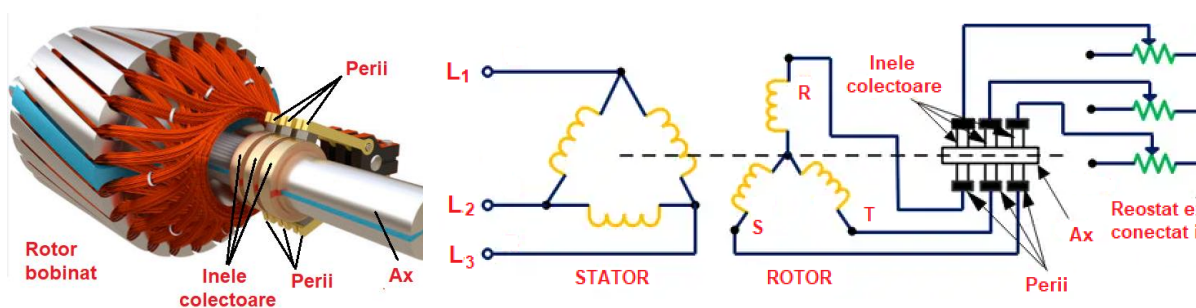


Fig. 5.2. Structura și schema de conexiune a rotorului bobinat al unei mașini de inducție

La alimentarea bobinajului statoric cu un sistem trifazat de tensiuni se va forma un sistem de curenți ce vor produce un **câmp magnetic învârtitor** (Figura 5.3). Acesta va induce în conductoarele din rotor o tensiune electromotoare. În circuitul închis din rotor se vor forma curenți ce vor produce un câmp magnetic în același sens cu cel al câmpului statoric. Interacțiunea celor două câmpuri va pune în mișcare rotorul în sensul câmpului magnetic învârtitor. Motorul se numește asincron pentru că turația rotorului este întotdeauna mai mică (pentru regimul de motor) decât turația câmpului magnetic învârtitor, denumită și turație de sincronism. Dacă turația rotorului ar fi egală cu turația de sincronism atunci nu ar mai avea loc fenomenul de inducție electromagnetică, nu s-ar mai induce curenți în rotor și motorul nu ar mai dezvolta cuplu.

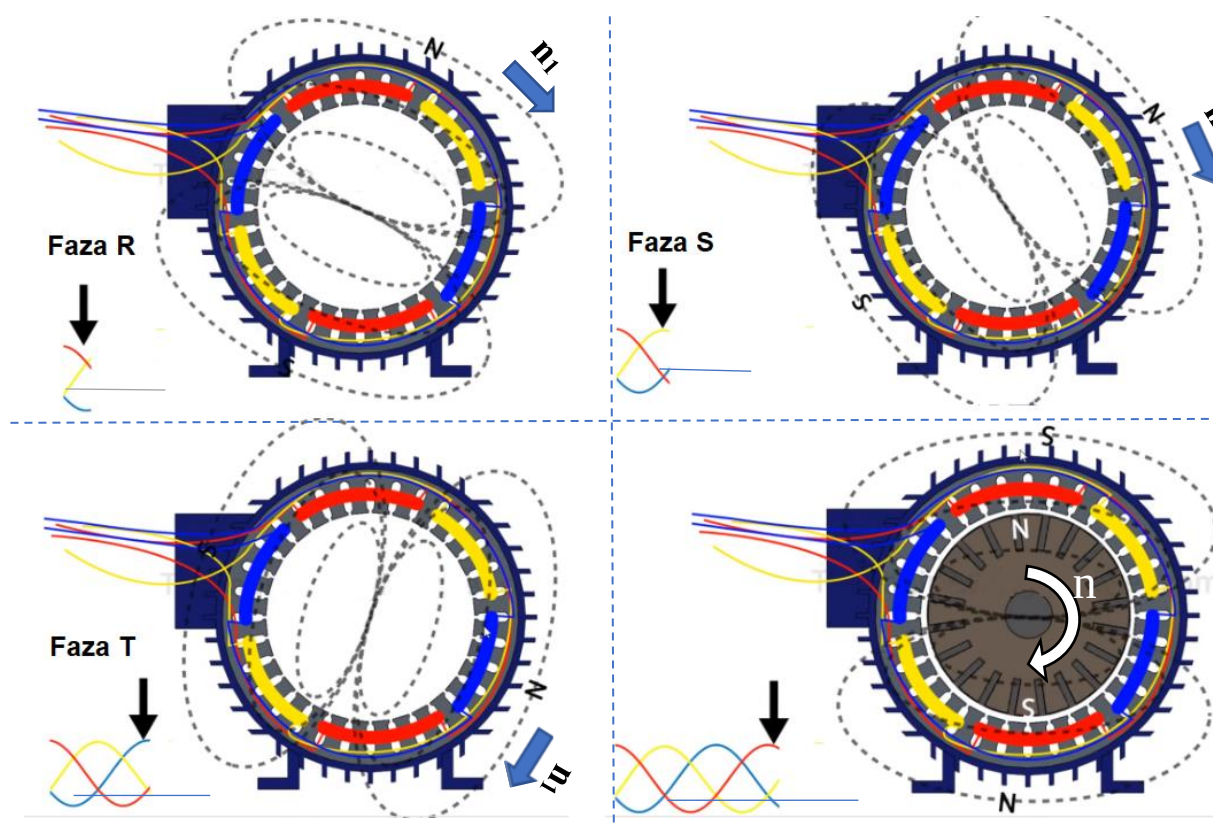


Fig. 5.3. Formarea câmpului magnetic învârtitor la alimentarea bobinajului statoric cu un sistem trifazat de tensiuni

Turația câmpului magnetic învârtitor este dată de frecvența de alimentare și numărul de perechi de poli ce se formează în stator:

$$n_1 = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (5.1)$$

unde: f – frecvența de alimentare;
 p – numărul de perechi de poli.

Pentru o frecvență de alimentare de 50 Hz, se vor obține următoarele turații în funcție de numărul de perechi de poli:

P	1	2	3	4	...
n_1	3000	1500	1000	750	...

O mărime specifică acestui tip de mașină electrică este **alunecarea**, notată cu „s”, fiind dată de diferența între turația motorului și turația câmpului magnetic învârtitor statoric:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (5.2)$$

unde: n_1 – turația de sincronism;
 n – turația rotorului.

Modificarea turației se poate face prin modificarea frecvenței tensiunii de alimentare, a numărului de perechi de poli sau prin modificarea alunecării. Modificarea sensului de rotație al rotorului se face prin schimbarea succesiunii fazelor (prin schimbarea a două faze ale tensiunii de alimentare între ele).

5.2. Regimurile de limită de funcționare a mașinii de inducție

5.2.1. Regimul de motor de mers în gol

Reprezintă funcționarea motorului de inducție când la axul său nu este conectată o sarcină. În această situație turația rotorului se apropie de cea de sincronism, alunecarea având valori apropiate de 0. La pornirea motorului de inducție prin conectare directă la rețea acesta va absorbi un curent mărit (de până la 6-10 ori mai mare decât cel nominal), pentru o perioadă scurtă de timp (până la atingerea turației nominale). După stabilizarea turației valoarea curentului absorbit de la rețea la funcționarea în gol va acoperi pierderile în bobinaj și în fier plus cele mecanice (în lagăre, prin ventilație). În cadrul acestei încercări se vor determina parametrii schemei echivalente.

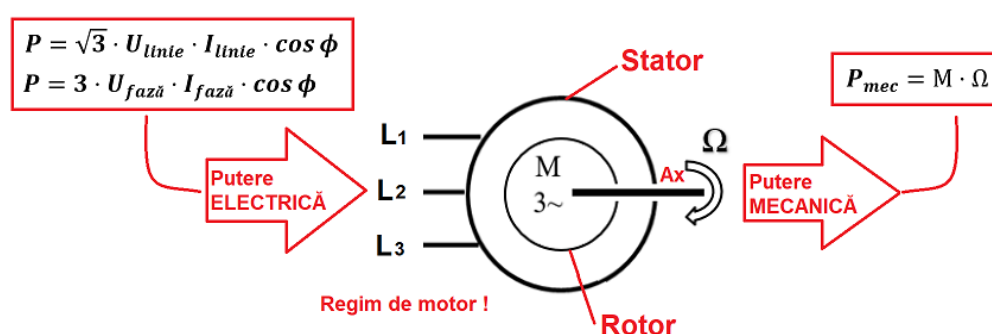


Fig.5.4. Mașina de inducție în regim de motor

În practică acest regim se poate realiza prin alimentarea mașinii de inducție de la rețea cu înfășurarea rotorică în scurtcircuit și fără sarcină cuplată la arbore. În acest regim mașina absoarbe de la rețea o putere necesară acoperirii pierderilor în fier, în înfășurarea statorului și a pierderilor mecanice (neglijând pierderile suplimentare și cele din înfășurarea rotorului). Montajul experimental pentru încercarea la mers în gol a mașinii de inducție este prezentat în Figura 5.5.

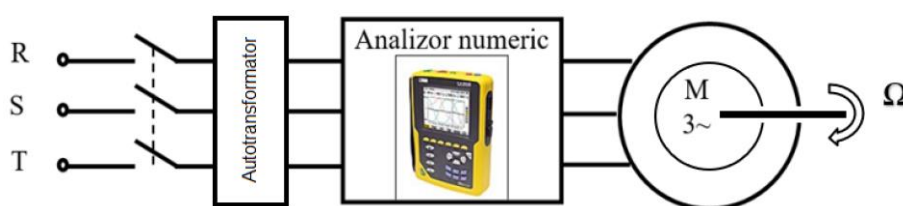
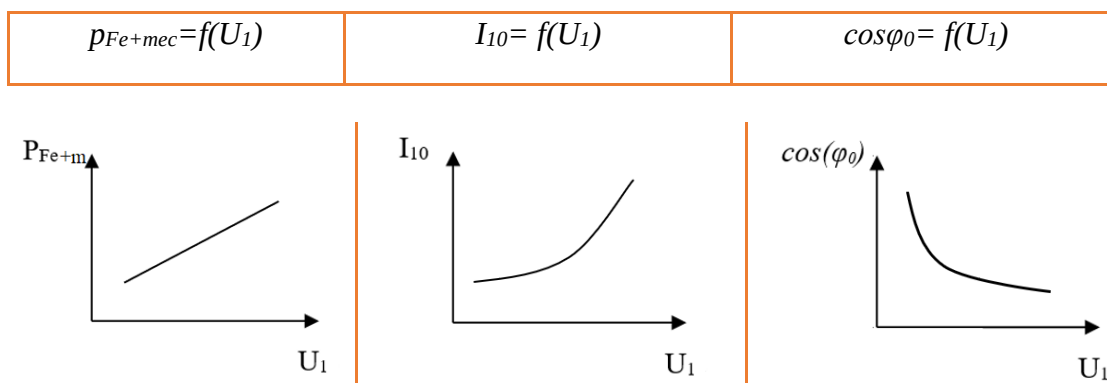


Fig.5.5. Montaj experimental pentru încercarea la mersul în gol a mașinii de inducție

Pentru tensiune de alimentare variabilă, de la o valoare minimă până la $1.2U_N$ se măsoară curentul statoric - I_{10} , puterea absorbită de mașină - P_{10} , indicațiile aparatelor de măsură notându-se în tabelul 5.1.

Pierderile în înfășurările statorului	Pierderile în fier și pierderile mecanice	Rezistența la mers în gol	Reactanța la mers în gol	Factorul de putere la mers în gol
$p_{Cu s0} = 3 \cdot R_1 \cdot I_{10}^2$	$p_{Fe+mec} = P_{10} - p_{Cu s0}$	$R_0 = \frac{P_{10}}{3 \cdot I_{10}^2}$	$X_0 = \sqrt{\left(\frac{U_{1N}}{\sqrt{3} \cdot I_{10}}\right)^2 - R_0^2}$	$\cos \phi_0 = \frac{P_{10}}{\sqrt{3} \cdot U_{10} \cdot I_{10}}$

Se ridică apoi cu datele din tabel caracteristicile următoare:



Separarea pierderilor mecanice de cele în fier se realizează prin reprezentarea p_{Fe+mec} în funcție de U_1^2 , extrapolându-se partea rectilinie inferioară a acestei curbe până la intersecția ei cu axa ordonatelor. Segmentul obținut pe axa ordonatelor reprezintă pierderile mecanice ale motorului. Pentru valoarea nominală a tensiunii de alimentare datele se trec în tabelul 5.2.

5.2.2. Regimul de scurtcircuit

Reprezintă funcționarea motorului când rotorul este blocat mecanic. În acest caz valoarea alunecării este 1 și pentru a limita curentul în mașină tensiunea de alimentare este redusă, fiind determinați parametrii schemei echivalente și valoare cuplului dezvoltat de motor. Regimul de scurtcircuit corespunde funcționării cu rotorul calat (blocat) pentru care $s = 1$. Montajul experimental este prezentat în Figura 5.6. Rotorul se blochează mecanic, având grijă ca sensul de rotație să fie cunoscut (în caz contrar existând pericolul accidentării).

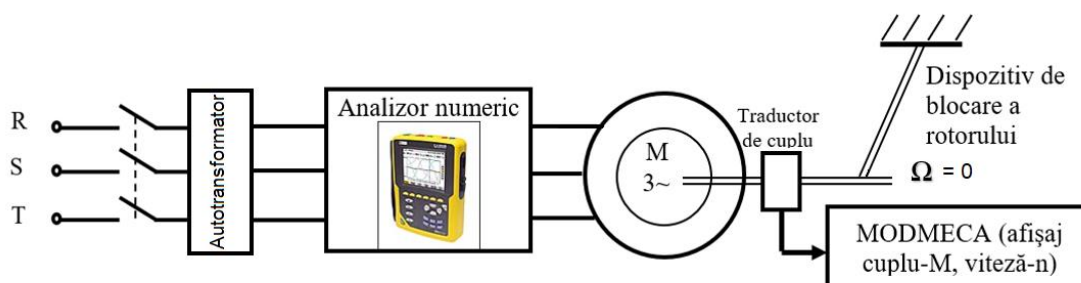
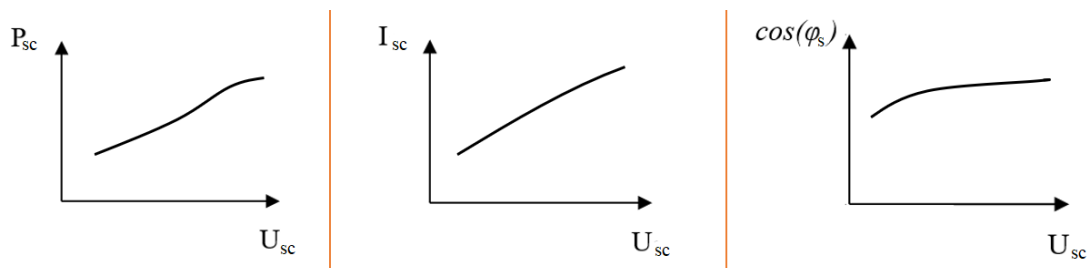


Fig. 5.6. Montaj experimental pentru încercarea la scurtcircuit a mașinii de inducție

Înfășurarea statorică se alimentează de la o sursă de tensiune variabilă cu tensiune redusă, între $0.2 \cdot U_N$ și $0.6 \cdot U_N$. Se măsoară curentul I_{sc} , puterea P_{sc} și cuplul dezvoltat la arbore, M_{sc} . Datele se trec în Tabelul 5.3.

Se ridică apoi cu datele din tabel caracteristicile următoare:

$P_{sc}=f(U_{sc})$	$I_{sc}=f(U_{sc})$	$\cos\varphi_{sc}=f(U_{sc})$
--------------------	--------------------	------------------------------



Se calculează curentul de pornire utilizând valorile cele mai mari ale curentului și tensiunii măsurate. Cu I_{sc} , U_{sc} – valorile cele mai mari ale curentului și ale tensiunii măsurate la încercarea în scurtcircuit ; U_{sc}^* – abscisa la origine a tangentei la curba $I_{sc} = f(U_{sc})$ în punctul corespunzător valorii celei mai mari a curentului de scurtcircuit măsurat. Pentru valoarea nominală a curentului de scurtcircuit se măsoară tensiunea statorică și puterea absorbită de mașină. Măsurătorile se trec în tabelul 5.4.

Curentul de pornire la valori nominale	Cuplul de pornire la valori nominale	Reactanța la scurtcircuit	Rezistența la scurtcircuit
$I_{sp} = \frac{U_{sN} - U_{sc}^*}{U_{sc} - U_{sc}^*} I_{sc}$	$M_p = \frac{I_{sp}}{I_{sc}} M_{sc}$	$X_{sc} = \sqrt{\left(\frac{U_{sN}}{\sqrt{3} \cdot I_{sp}}\right)^2 - R_{sc}^2}$	$R_{sc} = \frac{P_{sc}}{3 \cdot I_{sc}^2}$

5.2.3. Determinarea parametrilor schemei echivalente

Din schema echivalentă a mașinii de inducție, la mersul în gol, se poate scrie:

$$\begin{aligned} R_0 &= R_s + R_m \\ X_0 &= X_{s\sigma} + X_m \end{aligned} \quad (5.3)$$

Valoarea lui R_s se poate determina prin măsurare directă, rezultând pentru R_m expresia:

$$R_m = R_0 - R_s \quad (5.4)$$

Rezistența înfășurării rotorice, raportată la stator, rezultă:

$$R'_r = \frac{R_{sc} - R_s}{X_0 - X_{sc}} X_0 \quad (5.5)$$

Reactanțele de scăpări se pot determina cu:

$$\begin{aligned} X_{s\sigma} + X'_{r\sigma} &= X_{sc} - \frac{(R_{sc} - R_s)^2}{X_0 - X_{sc}} ; \\ \frac{X_{s\sigma}}{X'_{r\sigma}} &= \frac{R_s}{R'_r} \end{aligned} \quad (5.6)$$

Reactanța de magnetizare rezultă:

$$X_m = X_0 - X_{s\sigma} \quad (5.7)$$

5.3. Caracteristicile de funcționare ale motorului de inducție

5.3.1. Scheme de montaj și modul de lucru

Scopul lucrării este ridicarea caracteristicilor de sarcină și mecanică ale mașinii de inducție. Caracteristicile de funcționare în sarcină se determină prin cuplarea la arborele motorului de inducție a unei mașini sincrone care funcționează în regim de generator și care debitează la bornele unei sarcini rezistive, trifazată, variabilă. Se va modifica sarcina până la valori utile de cca. $1.25P_{2N}$ și se vor realiza măsurători asupra mărimilor electrice (U_1 , I_1 și P_1), respectiv mecanice (turația și cuplul la arbore). Montajul experimental are schema prezentată în Figura 5.7.

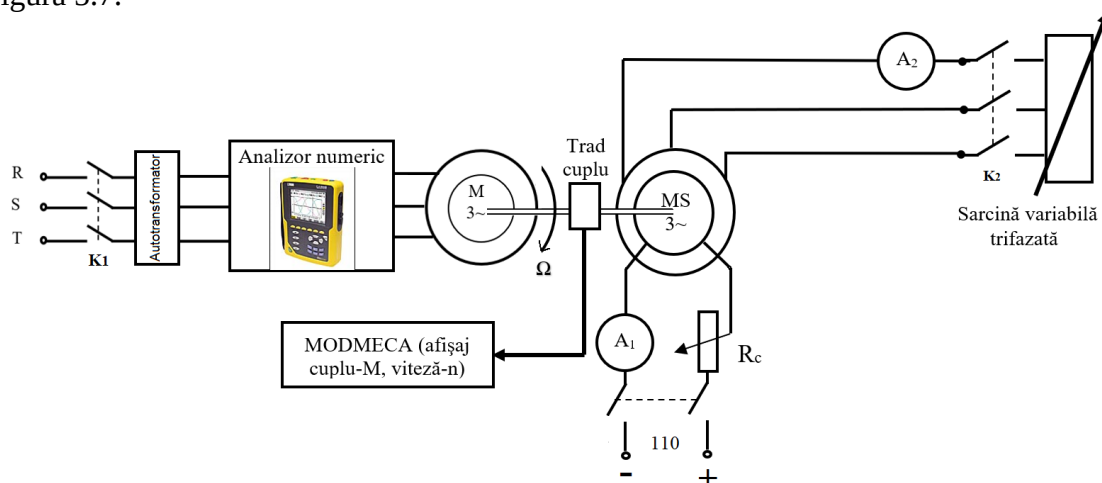


Fig. 5.7. Montaj experimental pentru ridicarea caracteristicilor de funcționare ale motorului de inducție

Pentru fiecare treaptă de sarcină a generatorului sincron se calculează factorul de putere ($\cos\phi$), puterea utilă (P_2), randamentul (η) și alunecarea (s). n_1 este turația de sincronism a mașinii de inducție.

Alunecarea	Randamentul	Puterea utilă	Factorul de putere
$s = \frac{n_1 - n}{n_1} 100$	$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100$	$P_2 = \frac{\pi \cdot n \cdot M_{util}}{30}$	$\cos \phi = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1}$

Datele obținute din măsurători și din calcule se vor trece în tabelul 5.5. Se vor ridica caracteristicile de funcționare: și caracteristica mecanică.

$I_1 = f(P_2)$	$\eta = f(P_2)$	$s = f(P_2)$	$P_1 = f(P_2)$	$M_{util} = f(s)$	$\cos \phi = f(P_2)$
----------------	-----------------	--------------	----------------	-------------------	----------------------

Tabelul 5.1. Măsurători pentru regimul de mers în gol

Marimi măsurate			R_1 [Ω]	Marimi calculate			
U_1 [V]	I_{10} [A]	P_{10} [W]		p_{Cu0} [W]	p_{Fe+mec} [W]	$\cos\phi_0$	U^2_1 [V ²]
100			5.6				
150							
200							
250							
300							
350							
400							
430							

Tabelul 5.2. Regimul de mers în gol la valori nominale

U_{1N} [V]	I_{10} [A]	P_{10} [W]	Z_0 [Ω]	R_0 [Ω]	X_0 [Ω]	k
400						

Tabelul 5.3. Măsurătorile pentru regimul de scurtcircuit

Mărimi măsurate				Mărimi calculate
I_{sc} [A]	U_{sc} [V]	P_{sc} [W]	M_{sc} [Nm]	$\cos\phi_{sc}$
1				
2				
3				
3,4				

Tabelul 5.4. Măsurătorile pentru regimul de scurtcircuit la valori nominale

I_{1scN} [A]	U_{1scN} [V]	P_{scN} [W]	Z_{sc} [Ω]	R_{sc} [Ω]	X_{sc} [Ω]

Tabelul 5.5. Caracteristicile de funcționare ale motorului de inducție

Mărimi măsurate					Mărimi calculate			
U_1 [V]	I_1 [A]	P_1 [W]	n[rot/min]	M_{util} [Nm]	$\cos\phi$	P_2 [W]	η [%]	s [%]
400								

6. MAȘINA SINCRONĂ

Numele acestei mașini vine din caracteristica ei principală de funcționare și anume faptul că viteza câmpului învârtitor este întotdeauna egală cu viteza mecanică a rotorului mașinii.

Mașina sincronă poate fi utilizată atât în regim de **generator** cât și în regim de **motor**. Totuși, în marea majoritate a aplicațiilor ea este utilizată ca și generator.

Generatoarele sincrone sunt realizate ca mașini sincrone trifazate și servesc pentru producerea energiei electrice. Motoarele sincrone se folosesc la acționarea unor utilaje de mare putere la care nu este necesară reglarea turației și care nu necesită porniri prea dese.

Mașina sincronă are două părți constructive de bază: **statorul** și **rotorul**.

Statorul mașinii sincrone este partea fixă (imobilă) a mașinii, și cuprinde: miezul magnetic statoric și înfășurările statorice. Miezul statoric este realizat din tole de oțel electrotehnic de 0,5 mm grosime izolate prin lăcuire sau oxidare. Miezul statoric are formă de coroană cilindrică și este prevăzut la periferia interioară cu creștături (șanțuri) longitudinale în care se așează înfășurarea statorică (trifazată). Înfășurările statorice, trifazate, sunt realizate de obicei din conductoare de cupru. În aceste înfășurări se induce tensiunea electromotoare, produsă de fluxul inductor creat de înfășurarea rotorică alimentată în c.c. și aflată în mișcare de rotație. De aceea statorul poartă denumirea de **indus al** mașinii sincrone.

Rotorul mașinii sincrone este partea mobilă a mașinii, care cuprinde miezul de fier rotoric, înfășurările rotorice (de curent continuu), inelele colectoare, perii. Inelele și perii servesc pentru alimentarea înfășurărilor rotorice. Există două forme constructive principale ale rotorului:

- **rotor cu poli aparenti**, format dintr-o serie de piese polare fixate de jug. Pe poli sunt așezate bobinele rotorice, numite bobine de excitație, alimentate în curent continuu astfel încât să formeze poli care să alterneze succesiv: N, S, N,...etc. Rotorul cu poli aparenti se folosește numai la mașini sincrone cu turație de cel mult 1000 rot/min (3 perechi de poli N-S) deoarece este dificil să se asigure o rezistență mecanică corespunzătoare la turații mai ridicate pentru această variantă constructivă.
- **rotor cu poli înecați**, format dintr-un bloc masiv cilindric de oțel prevăzut la periferie cu creștături longitudinale în care se așează înfășurarea rotorică de excitație. Din același bloc de oțel este realizat și arborele rotorului. Capetele înfășurării rotorice (de curent continuu) sunt conectate la două inele colectoare pe care alunecă o pereche de perii. Această variantă constructivă este preferată la viteze mari de rotație, de 1500 sau 3000 rot/min, datorită rezistenței mecanice mai ridicate și siguranței mai mari în funcționare.

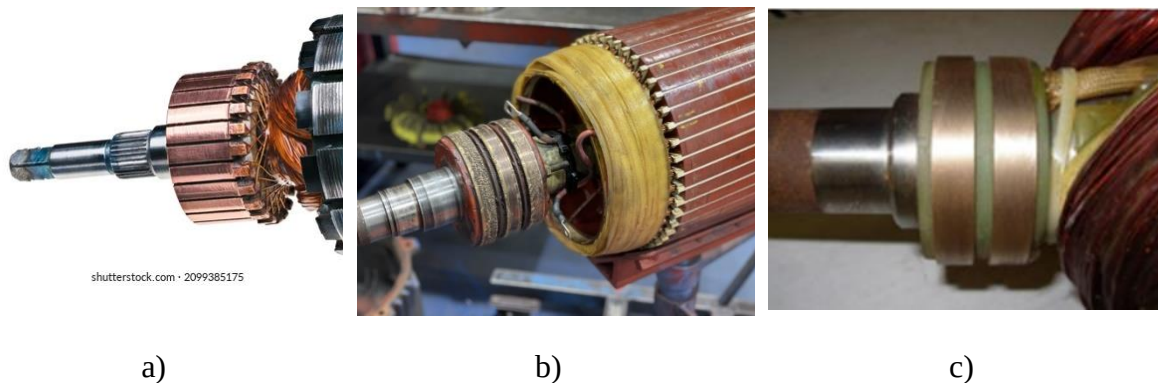


Fig. 6.1. Comparația la nivelul inelelor colectoare dintre rotoarele mașinilor clasice respectiv: a) Rotorul mașinii de curent continuu, b) Rotorul bobinal al mașinii de inducție, c) Rotorul mașinii sincrone

Alimentarea în curent continuu a înfășurării de excitație a mașinii sincrone se poate realiza de la un generator de curent continuu ce se află pe același arbore (ax) cu mașina sincronă, denumit excitatoare. Înfășurarea rotorică a generatorului, cea care prin mișcare de rotație induce tensiune electromotoare în înfășurările statorice se numește înfășurare de excitație sau **inductor**.

Generatoarele sincrone de turație mare (1500 sau 3000 rot/min) și de putere nominală mare se construiesc cu poli înecați și sunt antrenate de turbine cu abur, turbogeneratoare. Generatoarele sincrone cu poli aparenti, de turație redusă și putere nominală mare sunt antrenate, de regulă, de turbine hidraulice și se numesc hidrogeneratoare.

Încărcarea mașinii sincrone la arbore determină modificarea unghiului intern dintre tensiunea electromotoare indusă în înfășurarea statorică și tensiunea la bornele înfășurării statorice.

Acest unghi θ ia valori între 0 grade pentru funcționarea în gol și 90 de grade pentru încărcarea maximă pe care o poate suporta în mod ideal mașina sincronă.

6.1. Caracteristicile Generatorului Sincron Autonom

6.1.1. Scheme de montaj și modul de lucru

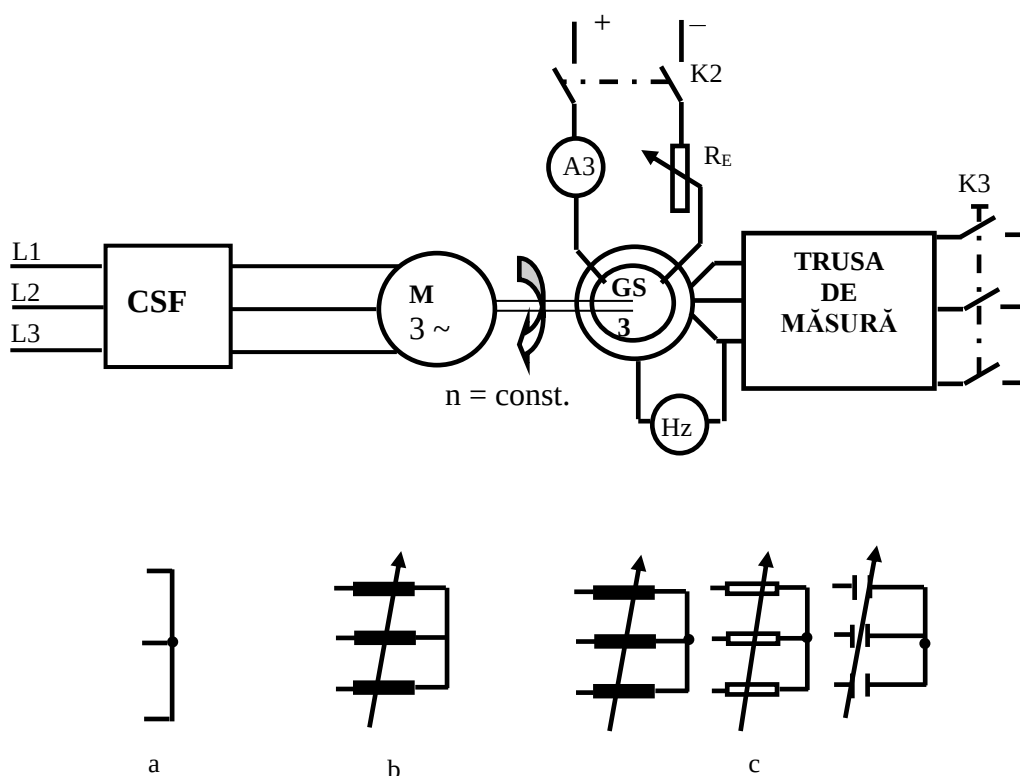


Fig. 6.2. Montajul experimental.

Antrenarea generatorului sincron autonom se realizează prin cuplarea la arbore cu un motor asincron cu rotorul în colivie. Alimentarea acestuia se face prin intermediul unui convertor static de frecvență **CSF**. Comandând acest convertor se poate modifica viteza motorului sincron astfel încât să ajungem la viteza corespunzătoare frecvenței nominale. Odată antrenat generatorul sincron la această viteză, se alimentează înfășurarea de excitație a

generatorului sincron prin închiderea lui K2. Pentru modificarea vitezei, respectiv a frecvenței tensiunii la bornele generatorului sincron se acționează panoul de comandă a CSF pentru creșterea sau scăderea vitezei de rotație a motorului asincron.

6.1.2. Regimul de mers în gol

Caracteristica de mers în gol este definită ca $U_0 = f(I_E)$, $I = 0$, $f = \text{ct.}$ Pentru ridicarea ei K3 se menține deschis. Cu întrerupătorul K2 închis, se crește curentul de excitație al generatorului sincron autonom de la valoarea 0 până la valoarea pentru care la bornele acestuia se măsoară o tensiune de aproximativ $1,3 \cdot U_N$. Rezultatele măsurătorilor se trec în tabelul 4.1. Apoi, în aceleași condiții, se descrește curentul de excitație, măsurându-se pentru fiecare valoare a acestuia, tensiunea la bornele generatorului. Datele se trec în tabelul 4.2.

Tabelul 6.1. Caracteristica în gol - la creșterea curentului I_E

I_E [A]										
U_0 [V]										

Tabelul 6.2. Caracteristica în gol - la descreșterea curentului I_E

I_E [A]										
U_0 [V]										

6.1.3. Regimul de mers în scurtcircuit simetric

Caracteristica de mers în scurtcircuit este definită ca $U_0 = f(I_E)$. Pentru ridicarea caracteristicii de scurtcircuit simetric, cele trei faze statorice se conectează conform figurii 4.1.a. și întrerupătorul k3 închis. Cu mașina antrenată la viteza de sincronism se măsoară curentul de scurtcircuit pentru valori crescătoare ale curentului de excitație. Datele se trec în tabelul 4.3.

Tabelul 6.3. Caracteristica în scurtcircuit $U = 0$

I_E [A]										
I [A]										

6.1.4. Regimul de mers în sarcină inductivă

Caracteristica de mers în sarcină reprezintă variația tensiunii la bornele generatorului în funcție de curentul de excitație. Pentru ridicarea caracteristicii în sarcină, la factor de putere inductiv, se conectează o sarcină inductivă constând dintr-un sistem trifazat de bobine cu circuit magnetic (miezul de fier) mobil. Pentru curent de sarcină, factor de putere și frecvență constante, datele se trec în tabelul 4.4. și se ridică caracteristica $U = f(I_E)$.

Tabelul 6.4 Caracteristica în sarcină inductivă $I = \text{cst.}$

I_E [A]										
U [V]										

6.1.5. . Regimul de mers în sarcină echilibrată

La funcționarea în sarcină echilibrată trebuie ridicate caracteristicile externe, respectiv de reglare ale generatorului sincron autonom, pentru factor de putere rezistiv, inductiv, respectiv capacativ, conectând la bornele K3 închis grupurile c din figura 4.1.

Pentru ridicarea caracteristicilor externe ($U = f(I)$) pentru factor de putere rezistiv, capacitiv, inductiv) se va proceda la antrenarea generatorului la viteza de sincronism cu valoarea curentului de excitație corespunzătoare U_N și f_N . Menținând constantă valoarea curentului de excitație, valoarea frecvenței și a factorului de putere, se mărește progresiv curentul de sarcină măsurând valoarea tensiunii la borne. Datele se trec în tabelul 4.5.

Tabelul 6.5. Caracteristici externe $I_E = \text{cst.}$

Sarcină rezistivă										
I [A]										
U [V]										
Sarcină inductivă										
I [A]										
U [V]										
Sarcină capacitivă										
I [A]										
U [V]										

În vederea ridicării caracteristicilor de reglare ($I_E = f(I)$) se ridică aducând generatorul sincron la mersul în gol la parametri nominali. Se mărește progresiv sarcina cu menținerea constantă a valorii nominale a tensiunii la borne (prin modificarea curentului de excitație, prin R_E) și a frecvenței. Datele se trec în tabelul 4.6.

Tabelul 6.6. Caracteristici de reglare $U = \text{ct.}$

Sarcină rezistivă										
I [A]										
I_E [A]										
Sarcină inductivă										
I [A]										
I_E [A]										
Sarcină capacitivă										
I [A]										
I_E [A]										

6.2. Cuplarea la rețea și funcționarea în paralel a generatorului sincron

6.2.1. Scheme de montaj și modul de lucru

Montajul experimental este prezentat în figura 4.2.

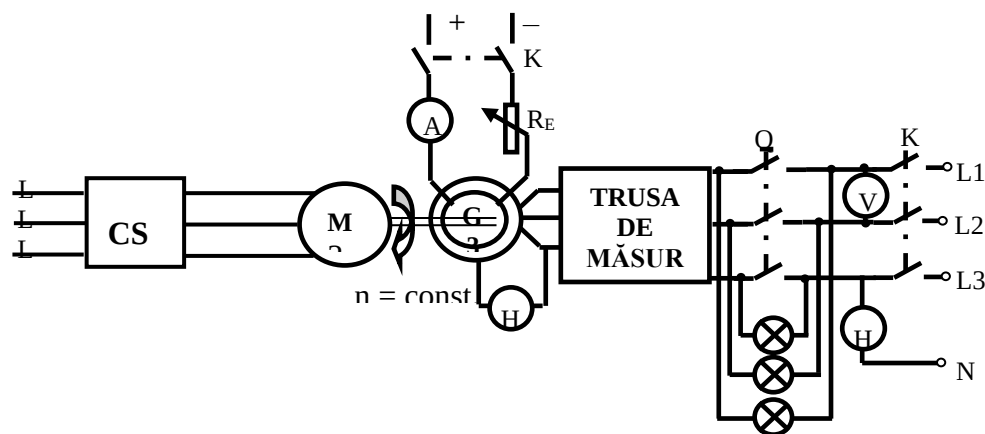


Fig. 6.3. Montajul experimental.

Antrenarea generatorului sincron autonom se realizează prin cuplarea la arbore cu un motor asincron cu rotorul în colivie. Alimentarea acestuia se face prin intermediul unui convertor static de frecvență. La viteza de sincronism se alimentează înfășurarea de excitație a generatorului sincron prin închiderea lui K2. Pentru modificarea vitezei, respectiv a frecvenței tensiunii la bornele generatorului sincron se acționează panoul de comandă a CSF pentru creșterea sau scăderea vitezei de rotație a motorului asincron.

6.2.2. Conectarea la rețea a generatorului sincron

Pentru conectarea generatorului sincron în paralel cu rețeaua trebuie îndeplinite următoarele condiții:

- egalitatea tensiunilor de linie, prin egalitatea indicației voltmetrului V2;
- egalitatea frecvențelor, prin egalitatea indicațiilor celor două hertzmetre;
- aceeași succesiune a fazelor, prin aprinderea și stingerea simultană a becurilor sincronoscopului;
- defazaj nul prin stingerea simultană a becurilor.

Pentru modificarea frecvenței generatorului se acționează în sensul modificării turației motorului asincron (prin CSF), pentru modificarea tensiunii de linie, se modifică valoarea curentului de excitație (prin R_E), iar în cazul unei succesiuni diferite a fazelor se inversează două faze ale generatorului sincron (după ce s-a decuplat excitația generatorului și rețeaua de alimentare).

Dacă cele trei condiții sunt îndeplinite, se procedează la închiderea manuală a contactorului Q în momentul în care becurile sincronoscopului sunt stinse (defazajul este nul).

6.2.3. Funcționarea generatorului sincron în paralel cu rețeaua

În vederea analizei funcționării generatorului sincron în paralel cu rețeaua se procedează la ridicarea caracteristicilor în V, caracteristici de reglaj definite ca dependența dintre curentul sarcină I și curentul de excitație I_E , pentru cazul particular în care mașina este încărcată în sarcină simetrică.

Tabelul 6.7.

U	Mărimi măsurate			Mărimi calculate
	P	I_E [A]	I [A]	$\cos\phi$

Puterea generatorului se stabilește succesiv la cca. 25% P_n , 50% P_n și 75% P_n (modificând frecvența de alimentare a motorului asincron prin CSF) și se urmărește variația curentului debitat de generator în funcție de curentul de excitație. Pentru fiecare valoare a curentului de excitație se calculează factorul de putere. Se reprezintă cele două caracteristici : $I = f(I_E)$ și $\cos\varphi = f(I_E)$. Pentru fiecare din cele trei curbe în V ale curentului, pentru care se obține I_{min} și se verifică ca la această valoare factorul de putere să atingă valoarea 1.

7. APLICAȚII

7.1. Intensitatea campului magnetic generat in aer de un conductor parcurs de curent este dependenta de:

- a. Mediul in care se genereaza campul
- b. Valoarea curentului care parcurge conductorul
- c. Distanța la care se masoara intensitatea

7.2. Intensitatea campului magnetic generat in interiorul unei bobine parcursa de curent este dependenta de:

- a. Mediul in care se genereaza campul
- b. Valoarea curentului care parcurge bobina
- c. Lungimea bobinei
- d. Numarul de spire al bobinei

7.3. Liniile de camp ale unui camp magnetic sunt:

- a. Cercuri concentrice cu centrul in centrul sectiunii conductorului care, parcurs de curent, generează campul
- b. Linii paralele in interiorul unei bobine parcurse de curent
- c. Linii deschise
- d. Linii inchise

7.4. Fluxul magnetic care inlantuie o spira fixa, aflata intr-un camp magnetic constant:

- a. Este constant
- b. Este variabil
- c. Depinde de suprafata spirei
- d. Depinde de unghiul dintre suprafata spirei si directia campului
- e. Depinde de unghiul dintre normala la suprafata spirei si directia campului

7.5. Fluxul magnetic care inlantuie o spiră aflată în mișcare într-un camp magnetic constant:

- a. Este constant
- b. Este variabil
- c. Depinde de suprafata spirei
- d. Depinde de unghiul dintre suprafata spirei si directia campului
- e. Depinde de unghiul dintre normala la suprafata spirei si directia campului

7.6. La bornele unei spire se poate culege tensiune electromotoare dacă:

- a. Spira este fixă și se află într-un câmp magnetic variabil
- b. Spira își modifică poziția într-un câmp magnetic variabil
- c. Spira își modifică poziția într-un câmp magnetic constant
- d. Spira este fixă într-un câmp magnetic constant

7.7. Cuplul dezvoltat asupra unei spire parcurse de curent electric aflată într-un câmp magnetic:

- a. Este proporțional cu intensitatea curentului electric care parcurge spira
- b. Este proporțional cu inducția magnetică a câmpului magnetic
- c. Are sensul dependent de sensul curentului electric
- d. Are sensul dependent de sensul câmpului magnetic
- e. Depinde de mediul în care este dezvoltat
- f. Depinde de unghiul dintre suprafața spirei și direcția câmpului magnetic

Transformator

7.8. Conversia de energie într-un transformator din primar în secundar se face cu:

- a. Modificarea tensiunii
- b. Modificarea curentului, frecvenței și tensiunii
- c. Modificarea curentului
- d. Modificarea vitezei la ieșire

7.9. Puterea absorbită de un transformator la funcționarea în gol reprezintă:

- a. Pierderile în miez
- b. Pierderile în înfășurări
- c. Puterea necesară magnetizării miezului magnetic

7.10. La un transformator trifazat de tipul Yy6 avem următoarele caracteristici:

- a. Înfășurarea primară conectată în stea, înfășurarea secundară conectată în stea și grupa de conexiuni 6
- b. Înfășurarea primară conectată în stea, înfășurarea secundară conectată în stea și defazajul între tensiunile de linie egal cu 180 de grade
- c. Înfășurarea primară conectată în stea, înfășurarea secundară conectată în stea, grupa de conexiuni 6, fără acces la nul

7.11. Miezul magnetic al transformatoarelor se realizează din tole pentru:

- a. A reduce pierderile prin histerezis în miezul magnetic
- b. A reduce pierderile prin curenți turbionari în miezul magnetic
- c. A reduce pierderile în miezul magnetic

- 7.12. Un transformator monofazat are puterea aparentă nominală egală cu 45 kVA, tensiunea nominală pe primar egală cu 4 kV, respectiv cea pe secundar egală cu 400 V. Transformatorul lucrează la un factor de putere nominal de 0.8 și un randament de 85%. Să se calculeze:
- Valoarea curentului la care se poate realiza încercarea la mers în scurtcircuit
 - Raportul de transformare al transformatorului
 - Valoarea curentului pe secundar la funcționarea în regim nominal.
- 7.13. Un transformator monofazat alimentat de la o sursă cu o valoare maximă a tensiunii pe primar de 310 V și frecvență de 50 Hz, lucrează la o putere activă cu 42.5 kW, la un factor de putere de 0.85. Pierderile la mers în gol au valoarea de 2.5kW, iar puterea activă la consumator este egală cu 36 kW. Factorul de transformare al transformatorului este egal cu 10. Să se calculeze:
- Valoarea puterii aparente la care lucrează transformatorul ;
 - Valoarea pierderilor în înfășurări;
 - Valoarea frecvenței tensiunii la consumator
- 7.14. Un transformator monofazat are următoarele date nominale: putere aparentă egală cu 10 kVA, tensiune pe primar egală 220 V, tensiune pe secundar egală cu 24 V și o putere nominală la consumator de 8.5 kW. Transformatorul lucrează la un randament egal cu 95% și la un curent de sarcină egal cu cel nominal. Să se calculeze:
- Valoarea puterii active la care lucrează transformatorul ;
 - Valoarea curentului absorbit de transformator;
 - Valoarea raportului de transformare.
- 7.15. Datele nominale ale unui transformator monofazat sunt: putere aparentă nominală 35 kVA și tensiuni primară și secundară nominale de 2400V, respectiv 120V, factor de putere de 0.85. După realizarea încercării la scurtcircuit pe partea de înaltă tensiune la o tensiune de 120V, puterea măsurată în circuit este egală cu 1200 W. Pierderile în miez sunt egale cu 0.02% din puterea activă nominală Să se calculeze:
- Randamentul la care lucrează transformatorul;
 - Valoarea rezistenței echivalente de circuit la mersul în scurtcircuit;
 - Valoarea raportului de transformare.

Mașina de inducție

- 7.16. O mașină asincronă cu 3 perechi de poli are puterea nominală egală cu 15 KW și este alimentată de la o sursă de energie cu tensiunea de linie de 400 V și frecvența de 50Hz. Mașina lucrează la un factor de putere de 0.85, cu un randament de 90%. Neglijând pierderile mecanice și suplimentare, și știind că mașina lucrează la o viteză de 960 rot/min să se calculeze:
- Alunecarea la care lucrează mașina;
 - Curentul absorbit de mașină de la rețea;
 - Cuplul la arbore dezvoltat de mașină.

- 7.17. O mașină asincronă cu 4 perechi de poli are puterea nominală egală cu 20 KW și este alimentată de la o sursă de energie cu tensiunea de linie de 380 V și frecvența de 50Hz. Mașina lucrează la un factor de putere de 0.85. Pierderile mecanice și cele suplimentare au valoarea de 500 W, iar randamentul la care lucrează mașina este de 90%. Alunecarea mașinii are valoarea de 0.025. Să se calculeze:
- Viteza la care lucrează mașina;
 - Curentul absorbit de mașină de la rețea;
 - Cuplul electromagnetic dezvoltat de mașină.
- 7.18. O mașină asincronă cu 3 perechi de poli și viteza de sincronism egală cu 4500 rot/min, are puterea nominală egală cu 50 KW și este alimentată de la o sursă de energie cu tensiunea de linie de 380 V. Alunecarea mașinii are valoarea egală cu 0.03. Mașina absoarbe de la rețea un curent egal cu 60 A. Neglijând pierderile mecanice și suplimentare, Cuplul electromagnetic dezvoltat de mașină este egal cu 90 Nm și suma pierderilor pe rotor are valoarea de 1 kW. Să se calculeze:
- Frecvența de lucru a mașinii;
 - Viteza de lucru a mașinii.
 - Randamentul la care lucrează mașina;
- 7.19. O mașină asincronă cu 2 perechi de poli este alimentată de la o rețea cu tensiunea de fază de 220V și frecvența de 50 Hz și lucrează la un factor de putere de 0.9, un randament de 85% și o alunecare de 0.02. Puterea utilă, transmisă sarcinii este egală cu 10 kW. Se neglijează suma dintre pierderile mecanice și suplimentare. Să se calculeze:
- Puterea mecanică debitată de mașină;
 - Curentul absorbit de mașină;
 - Viteza de lucru a mașinii.

Mașina sincronă

- 7.20. O mașină sincronă trifazată, lucrează la o turație de 1500 rot/min, un randament de 95% și un factor de putere de 0.9, absoarbe de la rețea un curent de 60A. Rețeaua are o tensiune de linie de 381V și o frecvență de 50Hz. Să se calculeze :
- Numărul de poli ai mașinii;
 - Puterea activă absorbită de mașină de la rețea;
 - Cuplul electromagnetic dezvoltat de mașină.
 - Pierderile totale în masina
 - Cuplul de antrenare a sarcinii
- 7.21. O mașină sincronă trifazată debitează pe o rețea cu o tensiune de linie de 400 V și o frecvență de 50Hz. Mașina are 3 perechi de poli și lucrează la un randament de 95% și un factor de putere de 0.9, alimentând rețeaua cu 50 A. Să se calculeze:
- Viteza de lucru a mașinii;
 - Puterea activă debitată de mașină în rețea;
 - Cuplul de antrenare al mașinii.
 - Alunecarea masinii
 - Valoarea pierderilor mecanice

- 7.22. O mașina sincronă trifazată, având rezistența fazei statorice neglijabilă, absoarbe de la rețea o putere aparentă egală cu 9 kVA, la un factor de putere egal cu 0.8. Mașina furnizează sarcinii o putere utilă egală cu 6480 W, la o tensiune pe fază egală cu 120 V și frecvență de 50 Hz. Turatia de sincronism a mașinii este egală cu 1500 rot/min. Să se calculeze:
- Randamentul mașinii
 - Curentul absorbit
 - Turatia rotorului
 - Numărul de poli ai mașinii
 - Pierderile totale în mașina
- 7.23. O mașina sincronă trifazată, având rezistența fazei statorice neglijabilă, debitează într-o rețea cu tensiunea de fază de 200 V și frecvență de 50 Hz o putere activă aparentă egală cu 12 kVA, la un curent de 20 A și un factor de putere egal cu 0.9. Cuplul de antrenare a mașinii cu 4 poli este egal cu 76.43 Nm. Să se calculeze:
- Care este puterea activă debitată în rețea?
 - Care este puterea cu care este antrenat rotorul mașinii sincrone?
 - Care este randamentul mașinii?
 - Cu ce viteză este antrenat rotorul?
 - Care este valoarea pierderilor totale în mașina?
- 7.24. O mașina sincronă trifazată, având rezistența fazei statorice neglijabilă, debitează într-o rețea cu tensiunea de fază de 400 V și frecvență de 50 Hz o putere activă egală cu 21.6 kW, la un curent de 20 A și un factor de putere egal cu 0.9. Cuplul de antrenare a mașinii cu 6 poli este egal cu 257.96 Nm.
- Care este puterea cu care este antrenat rotorul mașinii sincrone?
 - Care este puterea aparentă debitată în rețea?
 - Care este randamentul mașinii?
 - Cu ce viteză este antrenat rotorul?
 - Care este valoarea pierderilor mecanice?
- 7.25. O mașina sincronă trifazată cu 5 perechi de poli absoarbe de la o rețea de 400 V tensiune de fază, o putere activă egală cu 180 kW, la un curent de fază egal cu 166.67 A, și dezvoltă un cuplu util de 544.59 Nm la o viteză a rotorului egală cu 3000 rot/min.
- Care este puterea utilă transmisă sarcinii?
 - Ce frecvență are rețeaua?
 - La ce randament lucrează mașina?
 - Ce factor de putere are mașina?
 - Ce putere aparentă absoarbe mașina de la rețea?

- 7.26. O mașina sincronă trifazată, având rezistența fazei statorice neglijabilă, debitează într-o rețea cu tensiunea de fază de 200 V și frecvență de 50 Hz o putere activă aparentă egală cu 13.5 kVA, la un curent de 22.5 A și un factor de putere egal cu 0.8. Cuplul de antrenare a mașinii cu 3 perechi de poli este egal cu 114.65 Nm.
- Care este puterea activă debitată în rețea?
 - Care este puterea cu care este antrenat rotorul mașinii sincrone?
 - Care este randamentul mașinii?
 - Cu ce viteză este antrenat rotorul?
 - Care este valoarea pierderilor totale în mașina?
- 7.27. O mașina sincronă trifazată, având rezistența fazei statorice neglijabilă, debitează într-o rețea cu tensiunea de fază de 180 V și frecvență de 50 Hz o putere activă aparentă egală cu 10.5 kVA, la un curent de 20.5 A și un factor de putere egal cu 0.81. Cuplul de antrenare a mașinii cu 3 perechi de poli este egal cu 100.65 Nm.
- Care este puterea activă debitată în rețea?
 - Care este puterea cu care este antrenat rotorul mașinii sincrone?
 - Care este randamentul mașinii?
 - Cu ce viteză este antrenat rotorul?
 - Care este valoarea pierderilor totale în mașina?
- 7.28. O mașina sincronă trifazată, având rezistența fazei statorice neglijabilă, debitează într-o rețea cu tensiunea de fază de 215 V și frecvență de 50 Hz o putere activă aparentă egală cu 15.5 kVA, la un curent de 25.1 A și un factor de putere egal cu 0.82. Cuplul de antrenare a mașinii cu 3 perechi de poli este egal cu 123.65 Nm.
- Care este puterea activă debitată în rețea?
 - Care este puterea cu care este antrenat rotorul mașinii sincrone?
 - Care este randamentul mașinii?
 - Cu ce viteză este antrenat rotorul?
 - Care este valoarea pierderilor totale în mașina?
- 7.29. O mașina sincronă trifazată, având rezistența fazei statorice neglijabilă, debitează într-o rețea cu tensiunea de fază de 230 V și frecvență de 50 Hz o putere activă aparentă egală cu 17.2 kVA, la un curent de 26.7 A și un factor de putere egal cu 0.83. Cuplul de antrenare a mașinii cu 3 perechi de poli este egal cu 137.6 Nm.
- Care este puterea activă debitată în rețea?
 - Care este puterea cu care este antrenat rotorul mașinii sincrone?
 - Care este randamentul mașinii?
 - Cu ce viteză este antrenat rotorul?
 - Care este valoarea pierderilor totale în mașina?

Referinte

- [1] Bălă, C. Mașini electrice, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1979.
- [2] Boldea, I., Atanasiu, Gh. Analiza unitară a mașinilor electrice, Editura Academiei R.S.R., București, 1983.
- [3] Bichir, N., ș.a. Mașini electrice, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1979.
- [4] Bogoevici, N. Electrotehnică și măsurări electrice, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1979.
- [5] Câmpeanu, A. Mașini electrice, Editura Scrisul Românesc, Craiova, 1988.
- [6] Centea, O., Micloși, V. Mașini și aparate pentru sudarea electrică, Ed. Tehnică, București, 1967.
- [7] Cioc, I., ș.a. Mașini electrice. Îndrumar de proiectare, Editura Scrisul Românesc, Craiova, 1985.
- [8] Dordea, T. Mașini electrice, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1977.
- [9] Drăgănescu, O. Încercările mașinilor electrice rotative, Editura Tehnică, București, 1987.
- [10] Fransua, Al., Măgureanu, R. Mașini și acționări electrice, Editura Tehnică, București, 1986.
- [11] Galan, N., ș.a. Mașini electrice, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1981.
- [12] Gheorghiu, I. S., Fransua, Al. Tratat de mașini electrice, Editura Academiei R.S.R., București: I. Mașini de c.c., 1968; II. Transformatoare, 1970; III. Mașini asincrone, 1971; IV. Mașini sincrone, 1972.