

MINISTERUL INVATAMINTULUI

INSTITUTUL POLITEHNIC "TRAIAN VUIA" TIMISOARA
FACULTATEA DE ELECTROTEHNICA

ING. MOHAMAD DIB AL-AKTAA

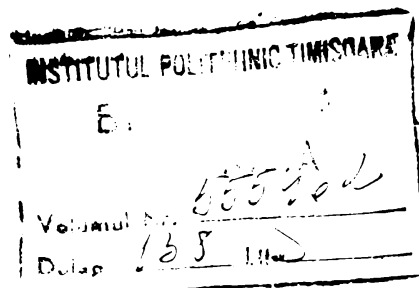
T E Z A D E D O C T O R A T

CERCETARI PRIVIND MOTOARELE DE INDUCTIE
IN COLIVIE CARACTERIZATE PRIN PORNIRE IN
CONDITII GRELE, CU APLICATII LA MASINILE
AVIND ROTORUL TURNAT IN ALUMINIU.

CONDUCATOR STIINTIFIC,
PROF.DR.ING.IOAN NOVAC

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

TIMISOARA
1990



C U P R I N S

=====

INTRODUCERE	1
<u>CAPITOLUL I.</u>	
ELEMENTE DE ORDIN CONSTRUCTIV SI DE TEORIE A MOTOARELOR ASINCRONE IN DUBLA COLIVIE	7
1.1.Considerații generale	7
1.2.Elemente de ordin constructiv	7
1.3.Ecuatiile de funcționare și schema electrică echivalentă a motorului de inducție în dublă colivie	10
1.4.Parametrii proprii și comuni ai celor două colivii rotorice	21
1.4.1.Parametrii proprii ai coliviei de pornire	21
1.4.2.Parametrii proprii ai coliviei de lucru	23
1.4.3.Parametrii comuni ai celor două colivii	25
1.5.Relatiile dintre parametrii proprii ai coliviilor și parametrii echivalenți nominali	28
1.6.Relatiile de interdependență între parametrii rotorici de pornire și cei nominali	29
1.7.Factorul de majorare a rezistenței și de micșorare a reactanței rotorice la pornire	32
<u>CAPITOLUL II.</u>	
MARIMILE FUNCTIONALE ALE MOTORULUI CU ROTOR IN DUBLA COLIVIE SI DEPENDENTA PARAMETRILOR ROTORICI DE MARIMILE DE PORNIRE	34
2.1.Mărimile funcționale ale motorului cu rotorul în dublă colivie	34
2.2.Mărimile de pornire ale motorului cu rotorul în dublă colivie	36
2.3.Dependența parametrilor rotorici de mărimile de pornire	37
2.4.Modul de variație al valorilor parametrilor rotorici ne- cesari a se realiza în funcție de valorile impuse pentru mărimile de pornire	44
<u>CAPITOLUL III.</u>	
PRINCIPALELE PARTICULARITATI ALE MOTOARELOR ASINCRONE IN DUBLA COLIVIE CU MARIMI DE PORNIRE PRETENTIOASE SI CONSECIN- TELE LOR ASUPRA CONCEPTIEI DE PROIECTARE	53
3.1.Considerații introductive	53
3.2.Modul de stabilire a dimensiunilor principale (D, L) ale motoarelor in dublă colivie cu mărimi de pornire exigente	56

I. P. T. V. T.	TEZĂ DE DOCTORAT	Pag.
3.3.	Problema randamentului și a factorului de putere nominal. Influența lor asupra dimensiunilor D, L.	68
3.4.	Problema cuplului de răsturnare al motoarelor în dublă colivie cu mărimi de pornire pretențioase	79
3.5.	Problema raportului dintre rezistențele R'_1 și R'_e	83
3.6.	Concluzii	86
<u>CAPITOLUL IV.</u>		
STUDIUL MODULUI DE DETERMINARE CORECTA, PRIN CALCUL, A PARAMETRIILOR ROTORICI AI ROTORULUI ÎN DUBLA COLIVIE TURNAT ÎN ALUMINIU		88
4.1.	Considerații generale	88
4.2.	Expunerea problemei	88
4.3.	Calculul reactanței X'_{2n}	90
4.4.	Calculul reactanței X'_{2p}	96
4.5.	Calculul rezistenței R'_{2n}	99
4.6.	Calculul rezistenței R'_{2p}	99
4.7.	Verificarea valabilității relațiilor propuse pentru calculul parametrilor rotorici ai rotorului în dublă colivie turnat în aluminiu	101
4.7.1.	Datele motoarelor executate și încercate	102
4.7.2.	Rezultatele încercărilor celor două motoare	103
4.7.3.	Determinarea, pe baza rezultatelor de la încercări, a parametrilor rotorici reali	113
4.7.4.	Parametrii rotorici calculați prin metoda clasică	117
4.7.5.	Parametrii rotorici calculați prin metoda de echivalări propusă în prezenta lucrare	118
4.7.6.	Concluzii	122
<u>CAPITOLUL V.</u>		
METODICA DE PROIECTARE A MOTOARELOR DE INDUCTIE ÎN DUBLA COLIVIE TURNATE ÎN ALUMINIU		124
5.1.	Considerații generale	124
5.2.	Stabilirea dimensiunilor principale și dimensionarea statorului	125
5.3.	Parametrii statorici. Determinarea parametrilor rotorici necesari	127
5.3.1.	Parametrii statorici	127
5.3.2.	Calculul lui s_n corespunzător statorului proiectat, la o solicitare electrică normală a rotorului	128
5.3.3.	Determinarea parametrilor rotorici necesari	132
5.4.	Stabilirea formei și dimensiunilor necesare ale creșturilor din rotor	134

I. P. T. V. T.	TEZĂ DE DOCTORAT	Pag.
5.5.	Calculul parametrilor rotorului proiectat	141
5.6.	Ordinograma și programul de calcul pentru determinarea dimensiunilor creștăturilor rotorice	144
<u>CAPITOLUL VI.</u>		
COMPORTAREA MOTOARELOR ASINCRONE ÎN DUBLĂ COLIVIE TURNATE ÎN ALUMINIU PE PARCURSUL PROCESULUI DE PORNIRE		152
6.1.	Considerații introductive	152
6.2.	Expresia practică a cuplului $M = f(s)$ a motorului asincron în dublă colivie	153
6.3.	Ordinogramă și program de calcul al curbei cuplului	156
6.4.	Curbele $M = f(s)$ ale motoarelor de 15 kW, 750 rpm și 22 kW, 1000 rpm, obținute cu programul de calcul	157
6.5.	Interpretarea rezultatelor obținute	159
<u>CAPITOLUL VII.</u>		
CONCLUZII		161
BIBLIOGRAFIE		165

INTRODUCERE

Revoluția tehnico-stiintifică din lumea contemporană a modificat fundamental strategia țărilor de dezvoltare a țărilor din "lumea a treia".

În mod deosebit a evidențiat trei direcții principale asupra cărora s-a acționat pe parcursul perioadei de modernizare economică : tehnologii noi, pregătirea profesională a cadrelor și calitatea produselor.

Pentru a reuși o valorificare maximă a resurselor naționale sau a materiilor prime importate este absolut necesar ca procesele tehnologice să fie gândite la parametri și indici calitativi superiori, cu aplicare imediată a rezultatelor cercetării științifice și tehnice în practică.

Asimilarea în fabricație a produselor noi impune o pregătire tehnologică fundamentată științific, care să cuprindă cât mai multe aspecte ale complexului sistem tehnico-economic. Astfel, un ciclu industrial complet trebuie să realizeze eliminarea rapidă a dezechilibrelor între exigențele beneficiarilor, pe de o parte, și potențialul tehnico-stiintific și resursele tehnico-economice, pe de altă parte. Acest proces amplitudinos și complex, obținut prin prospectarea pieței, cercetare, proiectare, fabricație, control de calitate și desfacere, nu formează un ciclu închis, ci o spirală care cuprinde sintetic progresul calitativ al produselor.

Pe lângă aceste considerații cu caracter general, în procesul de modernizare economică, de creștere a calității produselor, este nevoie de o privire lucidă asupra condițiilor inițiale, asupra realităților economice și sociale din fiecare țară în parte.

Se vor evalua resursele naturale, prețul materiilor prime pe piața mondială, tradițiile industriale și manufacturiere, gradul de instruire profesională a forței de muncă și posibilitățile de pregătire a acesteia.

Din aceste puncte de vedere au fost analizate și posibilitățile industriei electrotehnice, în particular ale industriei producătoare de mașini electrice, din Siria.

În conjunctura economică prezentă, marcată de creșterea prețurilor la energia electrică și la o serie de materii prime, pe piața mondială se cer mașini electrice optime, cu performanțe electrice ridicate, realizate la indici de productivitate a muncii

comparabili cu cei din alte ramuri economice și prezentînd o fiabilitate și o siguranță în funcționare îmbunătățite.

Deoarece în Siria există resurse naturale de cupru mai puține, prețul acestuia fiind în continuă creștere, iar pe de altă parte forța de muncă avînd calificare profesională ridicată nu se ridică la un număr suficient de mare, mi-am propus să studiez problema motoarelor asincrone, cu mărimi de pornire pretentioase, avînd rotorul turnat în aluminiu.

Cercetarea se înscrie în eforturile care se fac pentru realizarea de mașini electrice performante din toate punctele de vedere, în situația în care costul global al mașinii electrice, cuprinzînd materiile prime și prețul manoperei, se dorește redus.

De asemenea, această familie de motoare electrice, avînd disponibilități pentru condiții grele de pornire, îndeplinește astfel o cerință a economiei.

Se obțin în acest mod rezultate superioare, prin utilizarea de materii prime cu pret mai scăzut, timp de uzinare micșorat, reducere a manoperei și a numărului de rebuturi, oferind posibilitatea de creștere a prețului de vânzare, prin performanțele energetice și dinamice superioare.

În prezent, se folosesc pe scară largă diferite tipuri de motoare electrice : de curent alternativ, asincrone și sincrone, de curent continuu, de curent alterativ cu comutator, etc.

În literatura de specialitate se menționează că în cadrul acționărilor electrice motorul electric cel mai folosit este motorul asincron (sau de inducție). Se apreciază anume că din puterea totală folosită pentru acționările electrice, cca. 70% revine motoarelor de tip asincron. Aceasta se poate explica prin faptul că motorul asincron este cel mai simplu din punct de vedere constructiv, mai ieftin și în același timp și cel mai robust la solicitări.

Dintre cele două tipuri constructive, cu rotor bobinat, respectiv în colivie, la puteri mici și mijlocii se preferă de cele mai multe ori ultimul tip, de construcție mai simplă, fără contacte alunecătoare, etc.

Un dezavantaj al motorului asincron cu colivie normală este faptul că are cuplul de pornire relativ mic, de ordinul $(1,2-1,4)M_n$. Cum la pornire se folosesc metode de limitare a curentului absorbit la pornire (cu comutator stea-triunghi, cu autotransformator coborîtor de tensiune, etc.) cuplul de pornire se micșorează și mai

mult. Deci motorul asincron cu colivie normală se poate utiliza numai pentru acționarea mașinilor de lucru, care la pornire ($n = 0$) prezintă un cuplu rezistent mic. Însă de multe ori se pune problema pornirii motorului de acționare la o anumită sarcină (un anumit cuplu rezistent), mai mult sau mai puțin apropiată de sarcina nominală, sau chiar în plină sarcină.

Pornirea, în aceste cazuri, se poate realiza fără probleme deosebite, cu motoarele asincrone cu rotor bobinat, folosindu-se metoda de pornire cu ajutorul unui reostat rotoric, potrivit ales.

Dar, motoarele asincrone în colivie au, față de motoarele cu rotor bobinat, avantajul de a fi mai robuste, mai simple din punct de vedere constructiv și mai ieftine. Din aceste motive s-au căutat soluții de a mări cuplul de pornire al acestui tip de motor asincron, ele concretizându-se în realizarea lor fie cu bare înalte, fie cu o colivie dublă.

Cu asemenea motoare se pot obține, în mod curent, cupluri de pornire relative de ordinul $m_p = M_p/M_n = 1,8 \div 2,2$ în cazul motoarelor în colivie cu bare înalte, și $m_p = 2 \div 2,4$ în cazul motoarelor în dublă colivie. Asemenea cupluri rămân însă insuficiente pentru pornirile în plină sarcină, la folosirea metodelor de limitare a curentului absorbit amintite anterior. În această situație, în ultima perioadă s-a pus problema realizării de motoare în dublă colivie, capabile de cupluri de pornire proprii relative ridicate, de ordinul $m_p = 2,6 \div 3,0$. Ele își găsesc o largă utilizare în numeroase acționări caracterizate prin porniri dese, la sarcină nominală sau relativ ridicată, dintre care amintim, de exemplu, acționările din industria petrolieră, industria extractivă sau din instalațiile de foraj. De obicei, datorită puterii mai modeste a rețelei care stă la dispoziție, motoarele respective trebuie să prezinte și un curent de pornire relativ mai redus decât cel obișnuit pentru motoarele în colivie, care este de ordinul $i_p = I_p/I_n = 6 \div 7,5$.

În cele ce urmează, vom denumi drept motoare asincrone cu mărimi de pornire pretentioase (prescurtat m.p.p.) motoarele care prezintă cupluri de pornire relative $m_p = 2,6 \div 3,0$ și curenți de pornire relativi $i_p = 3,5 \div 4,5$ care corespund pretențiilor sporite cele mai dificile, în prezent.

Pentru motoarele asincrone în dublă colivie, în literatură este propusă^{5,12,32,34,37} o metodică de proiectare bazată pe ideea

că cele două colivii funcționează practic conectate în paralel ; ea este valabilă întrutotul numai în cazurile în care cele două colivii sînt distincte, fiind impuse cupluri de pornire relative ce nu depășesc valoarea $m_p = 2,4$ respectiv curenți de pornire relativi de ordinul $i_p = 5,5 \div 7,5$.

În cadrul acestor metode se admit anumite ipoteze simplificatoare, mai mult sau mai puțin numeroase, în funcție de autor.

Dimensionarea motoarelor conform acestor metodici este condusă, în general, pe baza mărimilor funcționale impuse (randament, factor de putere), mărimile de pornire rezultînd ca mărimi derivate, care se caută să se aduce la nivelul valorilor impuse prin proiectarea în consecință a rotorului.

Metoda este recomandată și pentru proiectarea motoarelor în dublă colivie turnate în aluminiu, diferențieri intervenind doar în ceea ce privește modul de dimensionare și calculul parametrilor părților frontale.

Cercetări mai recente²⁴⁻²⁹ privind particularitățile și modul de proiectare a motoarelor în dublă colivie cu mărimi de pornire pretențioase au condus la unele rezultate practice interesante și în cadrul acestor studii, ipoteza de bază admisă este aceeași, în sensul că cele două colivii sînt considerate ca funcționînd în paralel.

Experiența arată că rezultatele obținute prin metodica propusă se verifică în condiții foarte bune în cazul motoarelor cu două colivii distincte ; în cazul motoarelor cu coliviile turnate în aluminiu intervin însă unele diferențe între valorile calculate și cele obținute experimental (pentru motorul executat), mai ales în ceea ce privește unii parametri rotorici, respectiv cuplul și curentul la pornire. Explicația constă în aceea că motorul în dublă colivie turnată în aluminiu nu este, de fapt, un motor în dublă colivie în înțelesul propriu al cuvîntului ci, datorită umplerii cu material conductor și a istmului dintre creștăturile coliviei de pornire, un motor cu bare înalte, de o formă particulară.

În contextul tuturor considerațiilor anterioare, prezenta lucrare își propune, în principal, stabilirea particularităților privind dimensionarea cât mai corectă a motoarelor de tip asincron cunoscute sub denumirea de motoare în dublă colivie turnate în aluminiu, inclusiv pentru cazul mărimilor de pornire pretențioase.

În prima sa parte (Capitolul I), prezenta teză conține o ana-

liză succintă a construcției și a calculului parametrilor, respectiv a mărimilor funcționale și a celor de pornire ale motoarelor în dublă colivie, propuse în literatură.

În continuare sînt prezentate cercetările întreprinse de autor și rezultatele obținute, privind în principal următoarele probleme :

a) Modul de stabilire a mărimilor funcționale și de pornire, avînd în vedere relațiile de dependență a parametrilor rotorici de mărimile de pornire (Capitolul II) ;

b) Modul de stabilire a dimensiunilor principale ale motoarelor în dublă colivie turnate în aluminiu sau cu colivii distincte, avînd mărimi de pornire pretentioase, astfel ca ele să corespundă cerințelor privind mărimile de pornire și cele funcționale impuse (Capitolul III). În acest capitol se dezvoltă și analiza concepției de proiectare (structura înfășurării statorice ; solicitarea magnetică a mașinii ; solicitarea electrică a statorului, respectiv a rotorului ; valoarea alunecării nominale etc.) a motoarelor în dublă colivie cu mărimi pretentioase de pornire față de aceea a motoarelor în dublă colivie uzuale ;

c) În Capitolul IV este studiată problema modului în care urmează a se face calculul corect al parametrilor rotorici în cazul rotorului în dublă colivie turnat în aluminiu. Valabilitatea acestor relații, propuse de mine, este verificată prin compararea rezultatelor obținute prin calcul cu ajutorul lor cu parametrii rotorici rezultați pe baza încercării a două motoare (de 15 kW și 750 rpm, respectiv 22 kW și 1000 rpm) ;

d) Capitolul V conține metodică de proiectare pe care o propun pentru dimensionarea motoarelor în dublă colivie turnate în aluminiu, folosind pentru calculul parametrilor din rotor relațiile propuse la capitolul anterior.

Ea este însoțită, în finalul ei, de o organigramă și un program de calcul elaborat pentru stabilirea dimensiunilor necesare ale creștăturilor rotorice, determinante pentru a se obține datele impuse prin enunț ;

e) Ultimul capitol (Capitolul VI) conține un studiu referitor la curba cuplului motorului în dublă colivie și turnat în aluminiu, proiectat după metodică propusă. Se are în vedere stabilirea valorii cuplului minim, care intervine datorită existenței unei "șei"

în caracteristica $M = f(s)$, pentru a putea verifica dacă procesul de pornire se poate (sau nu) desfășura normal.

Teza se încheie cu un scurt capitol cu concluziile finale ale studiilor întreprinse.

CAPITOLUL I

ELEMENTE DE ORDIN CONSTRUCTIV SI DE TEORIE A MOTOARELOR ASINCRONE IN DUBLA COLIVIE.

1.1.Consideratii generale.

Motorul asincron cu dublă colivie are caracteristici în sarcină asemănătoare cu motorul cu bare înalte, dar caracteristicile de pornire sînt mai elastice. Aceste calități îl fac indicat pentru turații ridicate, respectiv pentru condiții grele de pornire.

Colivia de lucru este așezată la baza creștăturii, iar colivia de pornire spre deschiderea creștăturii rotorice. La pornire, alunecarea este mare și frecvența curenților din rotor este apropiată de frecvența din primar. Impedanța coliviei de lucru este mai mare decît impedanța coliviei de pornire. Prin urmare, curentul de pornire se închide, în principal, prin colivia de pornire, caracterizată de o rezistență mare pe fază și o reactanță de dispersie redusă. În funcționare la alunecări mici, reactanța de dispersie a înfășurării rotorului este mult diminuată, datorită frecvenței mici, astfel încît colivia de lucru și colivia de pornire sînt parcurse de curenți determinați în principal de rezistențele coliviilor ; ca urmare, în marea sa majoritate, curentul rotoric la alunecări caracteristice funcționării în regim normal se închide prin colivia de lucru.

1.2.Elemente de ordin constructiv.

Formele constructive cele mai des întîlnite pentru rotorul cu colivie dublă sînt reprezentate în Figura 1.1. Uneori, barele coliviei de pornire se realizează și de o formă dreptunghiulară.

În creștătura superioară este așezată înfășurarea de pornire (p), avînd bare cu secțiune mică, iar în cea inferioară înfășurarea de lucru (l) avînd bare cu secțiune relativ mult mai mare decît aceea a barelor coliviei de pornire. Creștăturile celor două colivii sînt legate între ele printr-o fantă (istm), ale cărei dimensiuni determină în cea mai mare parte reactanța de dispersie a înfășurării de lucru. În principal, pentru această reactanță de scîpări

este determinant raportul (h/a) . Pentru aceeași reactanță de scurțări, (h) , poate fi adoptat cu atât mai mic cu cât este mai mică lățimea (a) a istmului.

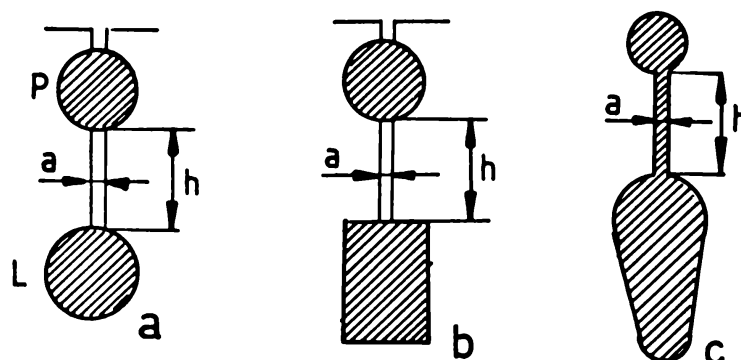


Figura 1.1. Formele constructive cele mai des utilizate pentru creșturile rotoarelor în dublă colivie.

Modalitățile de dispunere a barelor reprezentate în Figura 1.1 a) și b) se utilizează în cazul în care cele două colivii sînt separate (distincte), avînd inele de scurtcircuitare proprii. La aceste rotoare în dublă colivie barele coliviei de lucru (inclusiv inelele de scurtcircuitare) sînt de cupru, iar cele ale coliviei de pornire din cupru, bronz sau alamă. Executarea coliviei de pornire din alte materiale decît cupru se folosește avînd în vedere rezistivitatea lor mai mare, respectiv capacitatea lor termică mai ridicată - la pornire, încălzirea barelor (p) este mult mai mare decît cea a barelor (l) ; din acest motiv, barele coliviei de pornire (p) suferă o dilatare mai mare decît barele coliviei de lucru (l) , astfel că inelele de scurtcircuitare separate permit legături ale barelor mai sigure în funcționare.

Forma constructivă din Figura 1.1 c) este proprie motoarelor asincrone în dublă colivie turnate în aluminiu, avînd în vedere avantajele de ordin tehnologic ce intervin; în acest caz, cele două colivii sînt scurtcircuitate prin inele de scurtcircuitare comune.

În literatură mai sînt amintite și alte forme constructive, reprezentate în Figura 1.2.

Creșturile în care se găsesc barele (p) și (l) executate ca în Figura 1.2 a) nu sînt legate între ele printr-o fantă ocupa-

tă de material conductor, ci sînt separate. Barele de lucru sînt executate ca bare dreptunghiulare înalte.

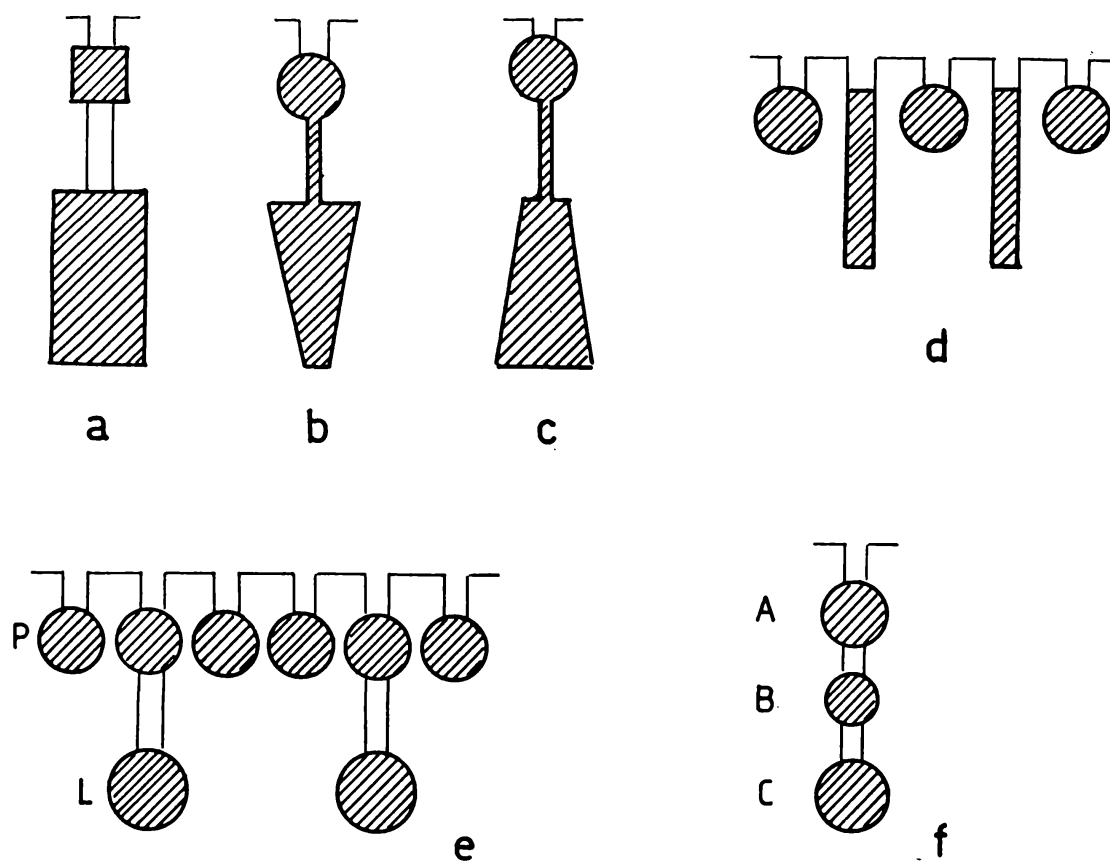


Figura 1.2. Alte forme constructive de creștături rotorice în dublă și triplă colivie.

Înfășurarea rotorului se poate executa și cu un număr de colivii distincte mai mare decât 2, așa cum se arată în Figura 1.2 f sau cu două colivii care au numere de creștături diferite (Figura 1.2 e).

Aceste forme constructive introduc anumite particularități în comportarea motorului, în general neesențiale. Avînd în vedere complicațiile de ordin constructiv care intervin, asemenea rotoare se execută în cazuri rare, motiv pentru care nu vor fi analizate în prezenta lucrare.

Pentru a se obține un contact cît mai bun între bare și inelele de scurtcircuitare și pentru asigurarea unei rezistențe mecanice corespunzătoare, dimensiunea axială a inelelor de scurtcircuitare

itare trebuie să fie suficient de mare (Figura 1.3 a). Formele de inele de scurtcircuitare folosite de obicei, când inelele sînt separate, se adoptă în strînsă legătură cu distanța dintre cele două colivii și cu secțiunile inelelor. Dacă se folosesc inelele de scurtcircuitare de formă dreptunghiulară, poziția lor relativă este prezentată în Figura 1.3 a). Plasarea inelelor de scurtcircuitare ale coliviei de lucru mai aproape de miez are drept scop evitarea măririi inutile a rezistenței acestei colivii.

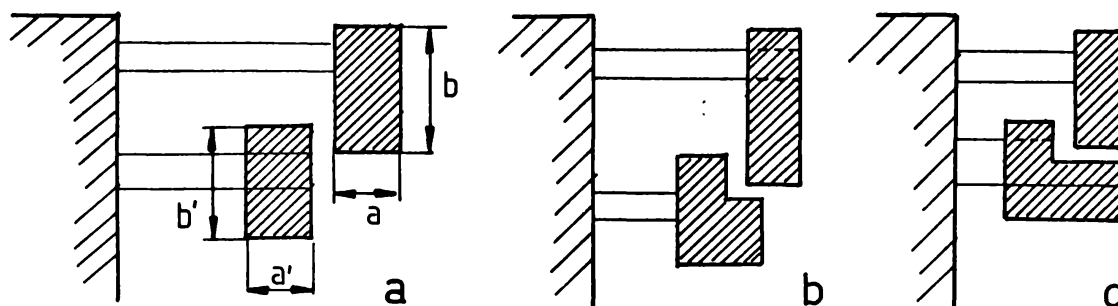
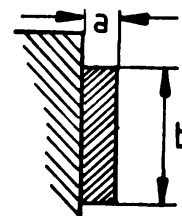


Figura 1.3. Formele inelelor de scurtcircuitare în cazul coliviilor distincte.

Așezarea mai îndepărtată de miez a inelelor coliviei de pornire nu prezintă nici un dezavantaj, colivia respectivă fiind de dorit să prezinte o rezistență mare.

În cazul dublei colivii turnate în aluminiu, inele de scurtcircuitare, comune ambelor colivii, sînt practic lipite de miez, din motive de ordin tehnologic (Figura 1.4).

Figura 1.4. Forma inelelor de scurtcircuitare în cazul dublei colivii turnate în aluminiu.



1.3. Ecuațiile de funcționare și schema electrică echivalentă a motorului de inducție în dublă colivie.

Sub aspectul comportării din punct de vedere electromagnetic motorul de inducție în dublă colivie ("cu două înfășurări induse") poate fi asimilat, în cazul reducerii rotorului la frecvența statorică, cu un transformator cu trei înfășurări și alimentare simplă, la care cele două înfășurări secundare sînt conectate în para-

lel și scurtcircuitate.

La neglijarea particularităților determinate de faptul că cele două colivii sînt înfășurări repartizate și că scurtcircuitarea lor se face prin inele de rezistență diferită de zero, motorul în dublă colivie poate fi reprezentat prin schema electrică echivalentă din Figura 1.5 (X'_{23} respectiv X'_{32} fiind reactanța de dublă dispersie, corespunzînd cîmpului de dispersie ce înlăntuie ambele colivii).

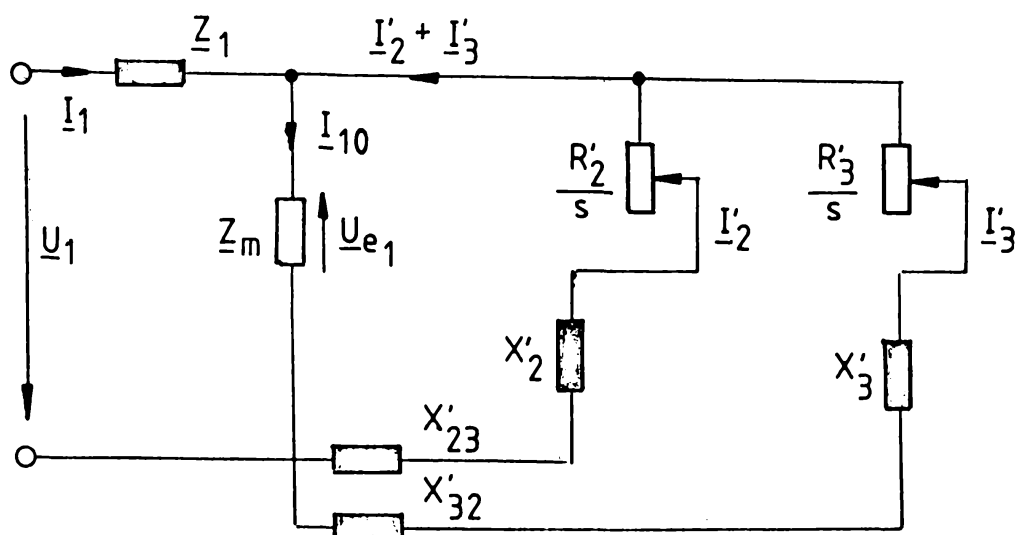


Figura 1.5. Schema electrică echivalentă a motorului de inducție cu rotorul în dublă colivie.

Admițînd că regimul este sinusoidal, ecuațiile care descriu comportarea mașinii sub aspect electromagnetic în regim permanent se pot exprima, în principiu, sub forma :

$$\begin{aligned}
 \underline{U}_1 &= \underline{Z}_1 \underline{I}_1 + jX'_{21} \underline{I}'_2 + jX'_{31} \underline{I}'_3 - \underline{U}_{e1} \\
 \underline{U}'_{e2} &= \underline{Z}'_2 \underline{I}'_2 + jX'_{32} \underline{I}'_3 + jX'_{12} \underline{I}_1 + \underline{U}'_2 \\
 \underline{U}'_{e3} &= \underline{Z}'_3 \underline{I}'_3 + jX'_{13} \underline{I}_1 + jX'_{23} \underline{I}'_2 + \underline{U}'_3 \\
 \underline{I}_1 + \underline{I}'_2 + \underline{I}'_3 &= \underline{I}_{10} ; \quad \underline{U}_{e1} = \underline{U}'_{e2} = \underline{U}'_{e3} = - \underline{Z}_m \underline{I}_{10}
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

unde $X'_{12} = X'_{21}$, $X'_{32} = X'_{23}$ și $X'_{31} = X'_{13}$ sînt reactanțele corespunzînd înlăntuirilor magnetice mutuale între perechile respective de

înfășurări reduse la înfășurarea statorică.

Datorită înfășurării inductoare în stator și a celor două înfășurări induse, plasate în rotor, de cele mai multe ori suprapuse, înălțuirile magnetice mutuale duble între înfășurarea statorică și una din înfășurările rotorice, practic, nu există, și prin urmare se poate considera :

$$X'_{12} = X'_{21} = X'_{13} = X'_{31} \stackrel{\approx}{=} 0$$

În această situație, introducând notația :

$$X' = X'_{23} = X'_{32}$$

ecuațiile pentru motorul în dublă colivie se reduc la :

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{Z}_1 \underline{I}_1 - \underline{U}_{e_1} \\ \underline{U}'_{e_2} &= \underline{Z}'_2 \underline{I}'_2 + jX' \underline{I}'_3 + \underline{U}'_2 \\ \underline{U}'_{e_3} &= \underline{Z}'_3 \underline{I}'_3 + jX' \underline{I}'_2 + \underline{U}'_3 \end{aligned} \quad (1.2)$$

$$\underline{I}_1 + \underline{I}'_2 + \underline{I}'_3 = \underline{I}_{10}$$

unde :

$$\underline{U}'_2 = R'_2 \frac{1-s}{s} \underline{I}'_2 \quad ; \quad \underline{U}'_3 = R'_3 \frac{1-s}{s} \underline{I}'_3 \quad (1.3)$$

Dacă se notează :

$$\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1 \quad ; \quad \underline{Z}'_{2s} = \frac{R'_2}{s} + jX'_2 \quad ; \quad \underline{Z}'_{3s} = \frac{R'_3}{s} + jX'_3$$

ecuațiile (1.2) devin :

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{Z}_1 \underline{I}_1 - \underline{U}_{e_1} \\ \underline{U}'_{e_2} &= \underline{Z}'_{2s} \underline{I}'_2 + jX' \underline{I}'_3 \\ \underline{U}'_{e_3} &= \underline{Z}'_{3s} \underline{I}'_3 + jX' \underline{I}'_2 \end{aligned} \quad (1.4)$$

$$\underline{I}_{10} = \underline{I}_1 + \underline{I}'_2 + \underline{I}'_3$$

Schema electrică echivalentă simplificată corespunzătoare ecuațiilor (1.4) este prezentată în Figura 1.6.

Dacă se admite că $X' \rightarrow 0$ (această reactanță are o valoare evident foarte mică), schema electrică echivalentă simplificată a rotorului se reduce la aceea reprezentată în Figura 1.7.

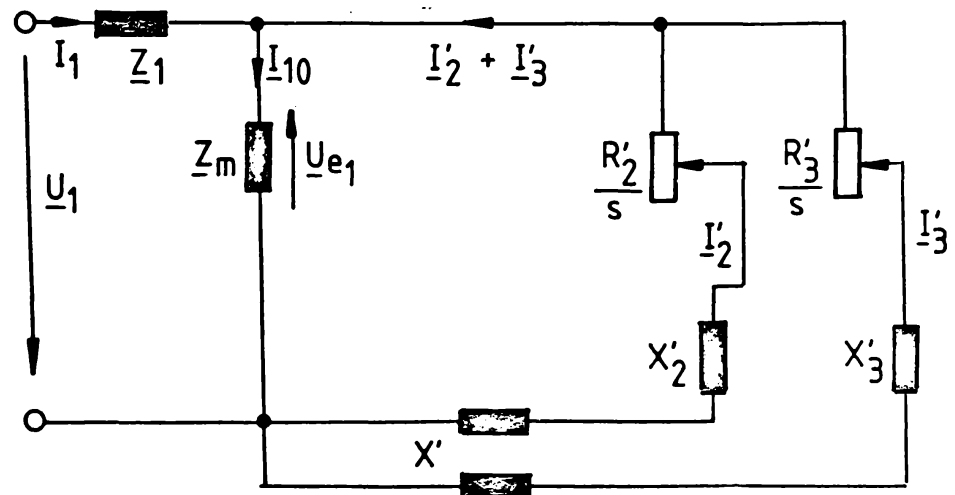


Figura 1.6. Schema echivalentă simplificată a motorului de inducție cu rotorul în dublă colivie, corespunzătoare ecuațiilor (1.4).

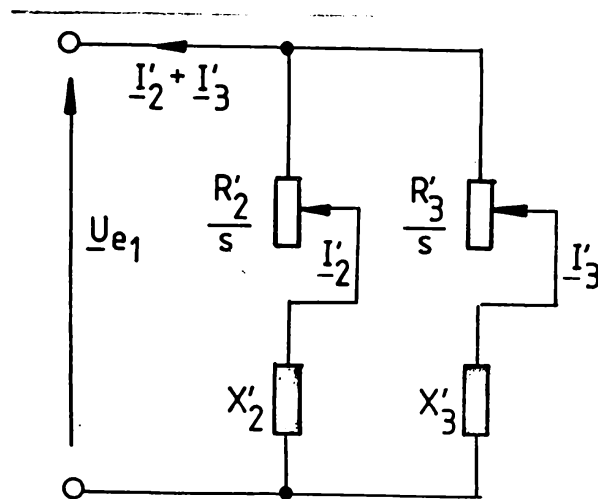


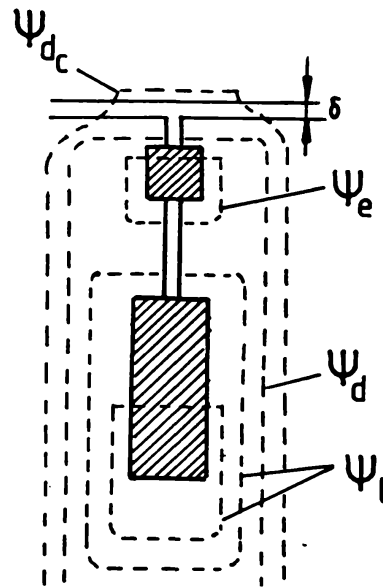
Figura 1.7. Schema echivalentă simplificată a rotorului motorului asincron în dublă colivie când se neglijează reactanța X' .

În realitate, datorită construcției concrete a înfășurărilor rotorice, fluxurile de dispersie rotorice prezintă mai multe componente, unele proprii fiecărei colivii (dispersia de creștătură a inelelor - în cazul a două colivii distincte), altele comune ambe-

lor colivii (dispersia la nivelul deschiderilor de crestătură, cea diferențială, a inelelor - dacă rotorul este turnat în aluminiu).

Potrivit configurației componentelor cîmpului de dispersie rotorice (Figura 1.8) în situația analizată (crestăturile celor două colivii așezate unele sub altele), cîmpul de dispersie diferențială Ψ_d și cel corespunzător deschiderii crestăturilor Ψ_{dc} trebuie atribuite întotdeauna ambelor colivii (corespunzînd curentului total din rotor $I'_R = I'_2 + I'_3$).

Figura 1.8. Configurația cîmpului rotorice de dispersie (Ψ_e - înlîn+uirea de dispersie a barei exterioare ; Ψ_i - a barei interioare ; Ψ_{dc} a deschiderii crestăturii ; Ψ_d - diferențială)



Dacă cele două colivii sînt scurtcircuitate prin inele comune cîmpul de dispersie al părților frontale ale înfășurărilor rotorice Ψ_f constituie linii de cîmp corespunzînd curentului I'_2 și curentului I'_3 , deci curentului rotorice total I'_R . În acest caz și rezistențele inelelor de scurtcircuitare sînt comune ambelor colivii, fiind parcurse de curentul total. Rezultă că schema electrică echivalentă din Figura 1.7 trebuie modificată. Această modificare constă în intercalarea în ramura comună a schemei a unei rezistențe R'_{c2}/s și a unei reactanțe de dispersie X'_{c2} , parcurse de curentul total I'_R . Vom utiliza indicele e pentru mărimile care se referă la colivia exterioară (de pornire) și indicele i pentru mărimile care se referă la colivia inferioară (de lucru). Schema electrică echivalentă a rotorului ținînd seama de modificarea amintită este dată în Figura 1.9.

Folosind indicele f pentru parametrii părților frontale, rezistențele R'_e , R'_i , R'_{c2} și reactanțele X'_e , X'_i și X'_{c2} sînt :

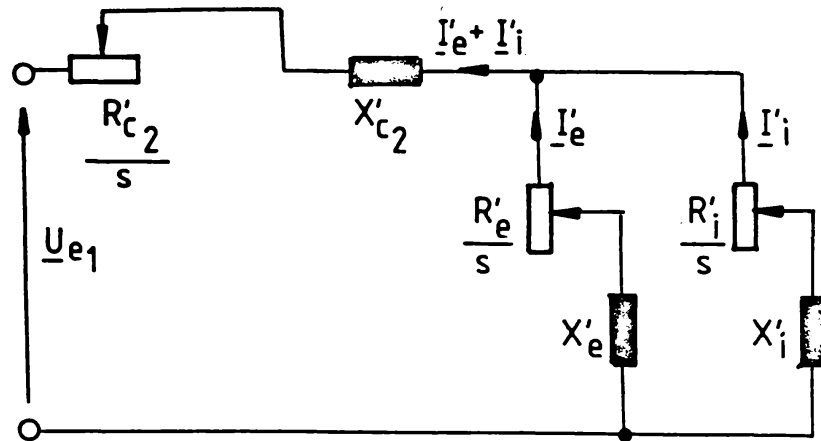


Figura 1.9. Schema electrică echivalentă a rotorului motorului asincron în dublă colivie + înfînd seama de R'_{c2} și X'_{c2} .

a) În cazul cînd coliviile sînt cu inele de scurtcircuitare proprii :

$$\begin{aligned} R'_e &= R'_{be} + R'_{fe} & R'_i &= R'_{bi} + R'_{fi} \\ X'_e &= X'_{be} + X'_{fe} & X'_i &= X'_{bi} + X'_{fi} \\ R'_{c2} &= 0 & X'_{c2} &= X'_{d2} + X'_{d'c2} \end{aligned} \quad (1.5)$$

b) În cazul cînd inelele de scurtcircuitare sînt comune :

$$\begin{aligned} R'_e &= R'_{be} & R'_i &= R'_{bi} \\ X'_e &= X'_{be} & X'_i &= X'_{bi} \\ R'_{c2} &= R'_{f'c2} & X'_{c2} &= X'_{d2} + X'_{d'c2} + X'_{f'c2} \end{aligned} \quad (1.6)$$

Impedantele celor două ramuri în paralel din schema echivalentă prezentată în Figura 1.9 sînt :

$$Z'_e = \frac{R'_e}{s} + jX'_e \quad ; \quad Z'_i = \frac{R'_i}{s} + jX'_i \quad (1.7)$$

Celor două impedanțe în paralel le corespunde o impedanță echivalentă a coliviilor rotorice :

$$Z'_{E_2} = \frac{R'_{E_2}}{s} + jX'_{E_2} \quad (1.8)$$

Astfel schema echivalentă din Figura 1.9 poate fi pusă și sub forma din Figura 1.10.

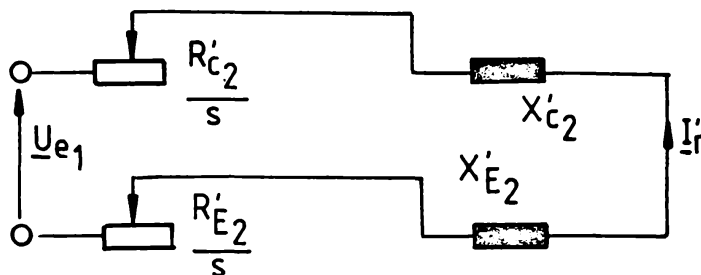


Figura 1.10. Schema echivalentă a rotorului de motor asincron în dublă colivie ținând seama de impedanța echivalentă a coliviilor rotorice Z'_{E_2} .

Componentele R'_{E_2} și X'_{E_2} ale impedanței echivalente a celor două colivii conectate în paralel, în ipoteza că se admite că $X'_e=0$, rezultă, după efectuarea calculului intermediare, de forma :

$$R'_{E_2} = \frac{(R'_e + R'_i)R'_eR'_i + s^2(R'_eX'^2_{i1} + R'_iX'^2_{e1})}{(R'_e + R'_i)^2 + s^2(X'_e + X'_{i1})^2} \quad (1.9)$$

$$X'_{E_2} = \frac{R'^2_{e1}X'_{i1} + R'^2_{i1}X'_{e1} + s^2X'_{e1}X'_{i1}(X'_e + X'_{i1})}{(R'_e + R'_i)^2 + s^2(X'_e + X'_{i1})^2} \quad (1.10)$$

Conform schemei echivalente din Figura 1.10, parametrii globali ai rotorului în dublă colivie rezultă :

$$R'_2 = R'_{c2} + R'_{E_2} ; \quad X'_2 = X'_{c2} + X'_{E_2} \quad (1.11)$$

Diferenții autori exprimă relațiile de calcul ale parametrilor respectivi sub diverse forme, care sînt însă, cum este și normal, echivalente cu cele stabilite anterior. De exemplu, se dau următo-

rele relații³² :

$$R'_{E_{2s}} = C_r(s)R'_e \approx \frac{(1 + \frac{1}{\alpha}) + s^2 \beta^2}{(1 + \frac{1}{\alpha}) + s^2 \beta^2} R'_e \quad (1.12)$$

$$X'_{E_{2s}} = C_X(s)X'_I \approx \frac{(\frac{1}{\alpha})^2 + s^2 \beta^2 \gamma}{(1 + \frac{1}{\alpha})^2 + s^2 \beta^2} X'_I \quad (1.13)$$

unde s-au notat cu :

$$\alpha = \frac{R_i}{R'_e} < 1 \quad (1.14)$$

$$\beta = \frac{X'_I}{R'_I} > 1 \quad (1.15)$$

$$\gamma = \frac{X'_e}{X'_I} \ll 1 \quad (1.16)$$

Ele sînt scrise în condițiile în care se neglijează reactanța X' și coeficientul γ^2 (avînd în vedere că $\gamma \ll 1$) și sînt practic echivalente cu relațiile (1.9) și (1.10).

Curbele $C_r(s)$ și $C_X(s)$ calculate conform relațiilor (1.12) și (1.13), parametrii fiind α și β , sînt reprezentate în Figura 1.11. La calculul lui $C_X(s)$, pentru γ s-a considerat valoarea, de obicei nedepășită, $\gamma = 0,2$. Pentru valori inferioare ale lui γ , rezultatele care se obțin sînt foarte puțin diferite de cele reprezentate în Figura 1.11.

Din curbele reprezentate în Figura 1.11 rezultă faptul că cu cît valoarea lui $\beta(\frac{X'_I}{R'_I} > 2)$ este mai mare, factorul de creștere a rezistenței rotorice la pornire $C_r(s)$ rezultă mai mare, fără însă ca prin aceasta să se producă neajunsuri în ceea ce privește valoarea rezistenței rotorice nominale. Se mai observă și influența importantă a valorii lui α privind creșterea rezistenței și micșorarea reactanței rotorice la pornire, respectiv privind valorile parametrilor rotorici în regim nominal. Mărirea lui α este avantajoasă prin efectul de amplificare mai accentuată a lui R'_{2p} (dar se micșorează X'_{2p}) și sub aspectul factorului de putere în regim de lucru.

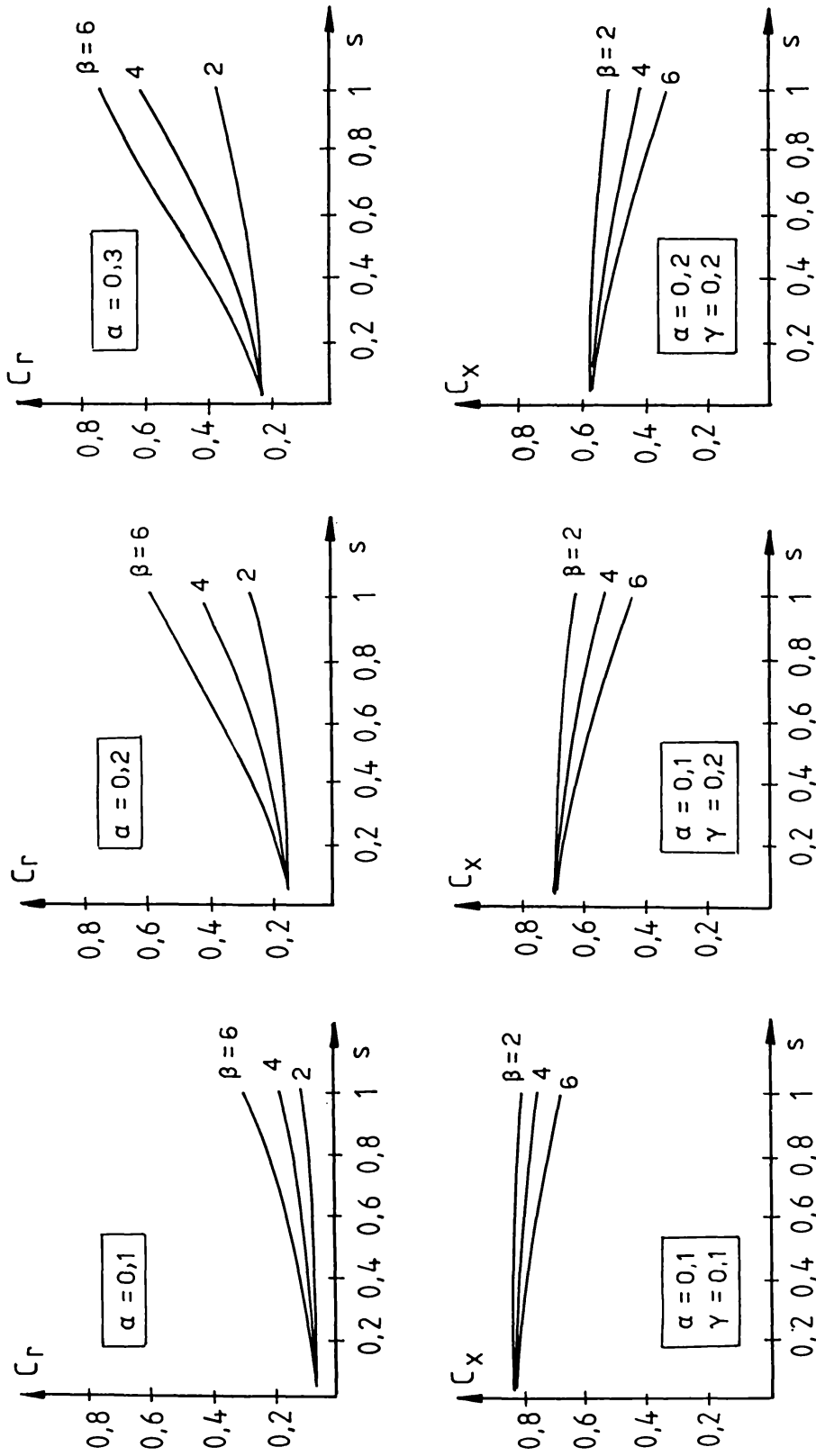


Figura 1.11 Curbele $C_r(s)$ și $C_x(s)$

În același timp această mărire a lui α este dezavantajoasă din punct de vedere al randamentului întrucât crește rezistența barelor coliviei de lucru. Asemenea valori ale lui α influențează negativ și valoarea curentului luat la pornire, care crește odată cu mărirea lui α . Rezultă că adoptarea unui factor α favorabil reprezintă una dintre problemele importante la dimensionarea rotorului în dublă colivie.

În situația în care se iau în considerare toți parametrii caracteristici rotorului, inclusiv X' , expresiile parametrilor R'_{2E} și X'_{2E} rezultă mai complicate. Și în acest caz, relațiile de definire ale lui R'_{2E} și X'_{2E} diferă formal de la un autor la altul, deși de fapt sînt echivalente. De exemplu, ele sînt exprimate sub forma⁵ :

$$R'_{2E} = \frac{R'_e R'_i R' + \epsilon^2 (R'_e X'^2_{11} + R'_i X'^2_{pp})}{R'^2 + \epsilon^2 X'^2} \quad (1.17)$$

$$X'_{2E} = \frac{(R'_e X'_i + R'_i X'_e) R' - R'_e R'_i X' + \epsilon (X'_e X' - X'^2_{pp}) X'}{R'^2 + \epsilon^2 X'^2} \quad (1.18)$$

unde :

$$R' = R'_e + R'_i \quad (1.19)$$

$$X' = X'_{pp} + X'_{11} \quad (1.20)$$

$$X'_{pp} = X'_e - X' \quad (1.21)$$

$$X'_{11} = X'_i - X' \quad (1.22)$$

unde X' este reactanța mutuală de dispersie a celor două colivii.

Dacă se explicitază diferenții termeni și se fac calculele intermediare, se ajunge la forma :

$$R'_{2E} = \frac{(R'_e + R'_i) R'_e R'_i + \epsilon^2 [R'_e (X'_i - X')^2 + R'_i (X'_e - X')^2]}{(R'_e + R'_i)^2 + \epsilon^2 (X'_e + X'_i - 2X')^2} \quad (1.23)$$

și respectiv :

$$X'_{2E} = \frac{R'^2 X' + R'_e R'_i X' + 2R'_e R'_i X' + \epsilon^2 (X'_e X' - X'^2_{pp}) (X' + X'_e - 2X')}{(R'_e + R'_i)^2 + \epsilon^2 (X'_e + X'_i - 2X')^2} \quad (1.24)$$

La funcționarea în sarcină nominală, alunecarea are valori foarte reduse, care nu depășesc, în general, valoarea $s_n = 0,05$. În aceste condiții, termenii înmulțiți cu s_n^2 din relațiile (1.23) și (1.24) devin neglijabili, astfel că parametrii echivalenți ai celor două colivii propriuzise, considerate conectate în paralel, la alunecarea normală de lucru, rezultă :

$$R'_{E_{2n}} = \frac{R'_e R'_i}{R'_e + R'_i} \quad (1.25)$$

$$X'_{E_{2n}} = \frac{R_e'^2 X'_i + R_i'^2 X'_e + 2 R'_e R'_i X'_e}{(R'_e + R'_i)^2} \quad (1.26)$$

La pornire, când $s = 1$, parametrii respectivi, la neglijarea efectului pelicular din barele coliviei de lucru, se obțin tot din relațiile (1.23) și (1.24), în care alunecarea se consideră egală cu 1. Ei rezultă :

$$R'_{E_{2p}} = \frac{(R'_e + R'_i) R'_e R'_i + R'_e (X'_i - X')^2 + R'_i (X'_e - X')^2}{(R'_e + R'_i)^2 + (X'_e + X'_i - 2X')^2} \quad (1.27)$$

$$X'_{E_{2p}} = \frac{R_e'^2 X'_i + R_i'^2 X'_e + 2 R'_e R'_i X' + (X'_e X'_i - X'^2)(X'_e + X'_i - 2X')}{(R'_e + R'_i) + (X'_e + X'_i - 2X')^2} \quad (1.28)$$

Dacă înălțimea barelor coliviei de lucru este $h_i > 12$ mm, pentru cupru, respectiv $h > 15$ mm pentru aluminiu, fenomenul de defulare a curentului în aceste bare trebuie luat în considerare, așa cum rezultă din literatură⁵; ca urmare, în relațiile (1.27) și (1.28), în aceste cazuri, în locul parametrilor R'_i și X'_i trebuie avute în vedere valorile $R'_{i\xi}$ și $X'_{i\xi}$, unde $R'_{i\xi} = k_R R'_i$ și $X'_{i\xi} = k_X X'_i$ ($k_R > 1$, $k_X < 1$).

La o alunecare oarecare $s < 1$ și apropiată de s_n parametrii R'_{E_2} și X'_{E_2} sînt determinați de relațiile (1.23) și (1.24), în care s se introduce de valoarea respectivă.

Cunoscînd parametrii rotorici la diferite valori ale lui s și parametrii statorici, curentul I'_2 se poate calcula cu relația :

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + \frac{C_1 R'_2}{s})^2 + (X_1 + C_1 X'_2)^2}} \quad (1.29)$$

notațiile avînd semnificațiile obișnuite.

În momentul pornirii, frecvența curenților induși în barele rotorului este egală cu frecvența curenților statorici, $f_2 = f_1$. Curentul în colivia superioară, care are o rezistență mare și o reactanță de dispersie mică, este aproape în fază cu tensiunea electromotoare indusă. Colivia inferioară, avînd o rezistență mică și o reactanță de dispersie mare, este parcursă de curenți defazați aproape în cvadratură cu tensiunea electromotoare și dezvoltă în consecință un cuplu de pornire mic. Pe măsură ce rotorul se accelerează, frecvența curenților rotorici scade, în mod corespunzător scad reactanțele de dispersie ale celor două colivii, care devin, la funcționarea în regim de lucru normal, practic neglijabile în raport cu rezistențele. Curenții în ambele colivii ajung practic în fază cu tensiunea electromotoare, cu observația că curentul din colivia superioară, datorită rezistențelor celor două colivii, va fi mult mai mic decît curentul din colivia inferioară. Prin urmare, în funcționarea în regim de lucru normal, cuplul electromagnetic, în principal, corespunde curentului din colivia inferioară (colivia de lucru) pe cînd la pornire cuplul principal este dezvoltat de colivia superioară (colivia de pornire).

În Figura 1.12 s-a reprezentat : caracteristica cuplului coliviei de pornire (curba a), caracteristica cuplului coliviei de lucru (curba b) și caracteristica rezultantă (curba c).

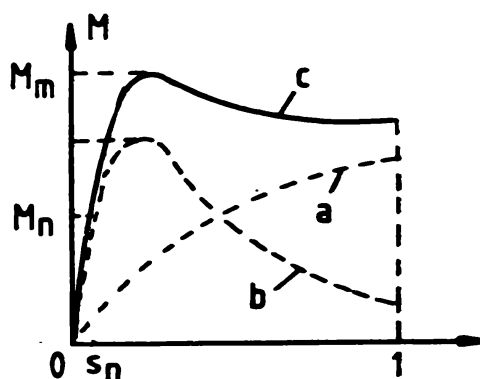


Figura 1.12. Dependența cuplului de alunecare la motorul asincron în dublă colivie : a, caracteristica cuplului dezvoltat de colivia de pornire ; b) caracteristica cuplului dezvoltat de colivia de lucru ; c) caracteristica rezultantă a cuplului.

1.4. Parametrii proprii și comuni ai celor două colivii rotorice.

1.4.1. Parametrii proprii ai coliviei de pornire.

Dacă colivia de pornire are inele de scurtcircuitare proprii, rezistența fazei rotorice redusă la stator este :

$$R'_e = k \left[\rho_{b_e} \frac{L_{b_e}}{q_{b_e}} + \rho_{i_{ne}} \frac{L_{i_{ne}}}{q_{i_{ne}}} \cdot \frac{1}{2 \sin^2 \frac{p\pi}{N_{c_2}}} \right] \quad (1.30)$$

unde :

$$k = \frac{m_1 (k_{b_1} N_1)^2}{m_2 (k_{b_2} N_2)^2}$$

este factorul de raportare a parametrilor rotorici la stator.

Dacă scurtcircuitarea barelor coliviei de pornire se face prin inele care sînt comune ambelor colivii (rotor în aluminiu), rezistența R'_e se reduce la :

$$R'_e = k \rho_{b_e} \frac{L_{b_e}}{q_{b_e}} \quad (1.31)$$

rezistența inelelor reprezentînd rezistența comună a celor două colivii.

Reactanța de dispersie în primul caz este dată de relația :

$$X'_e = k \cdot 2\pi f_1 \mu_0 L_i \lambda_e + X'_{f_e} \quad (1.32)$$

iar în al doilea caz de relația :

$$X'_e = X'_{crest} = k \cdot 2\pi f_1 \mu_0 L_i \lambda_e \quad (1.33)$$

unde λ_e , permeabilitatea specifică a creștăturii rotorice depinde de forma creștăturii și este :

a) dacă creștătura are formă circulară (Figura 1.13) : $0,66^5$,
 $0,61^2$, $0,623 \frac{1}{1 + \frac{b_4}{d_e}}^{32}$, $0,62^3$.

În situația în care $\frac{1}{5} < \frac{b_4}{d_e} < \frac{1}{3}$, pentru o precizie mai

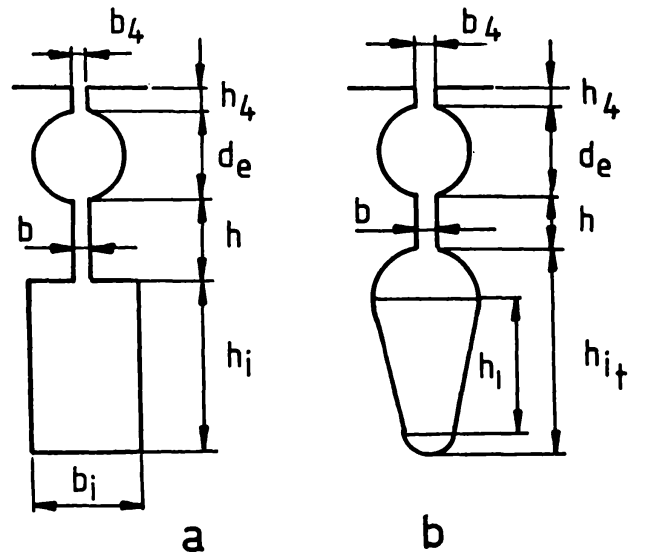


Figura 1.13. Dimensiunile creștăturilor coliviei exterioare și interioare.

mare³⁴, această permeanță se propune a se calcula cu relația :

$$\lambda_e = 0,5 \arcsin \sqrt{1 - \left(\frac{b_4}{d_e}\right)^2} \quad (1.34')$$

a cărei valoare, pentru limitele sus menționate, rezultă :

$$\lambda_e = 0,61 - 0,62$$

b) Dacă creștătura are formă dreptunghiulară ca în Figura 1.2 a), practic toți autorii propun relația de calcul :

$$\lambda_e = \frac{h_e}{3 b_e} \quad (1.35)$$

Relațiile prezentate scot în evidență că :

- pentru mărirea rezistenței coliviei de pornire se poate alege un material de rezistivitate mai mare ;
- reactanța X'_e a coliviei de pornire este întotdeauna de valoare redusă, în special la rotoarele în dublă colivie având inele de scurtcircuitare comune pentru cele două colivii ;
- valoarea permeanței λ_e depinde de forma barei (creștăturii) coliviei de pornire ; pentru bare (creștături) rotunde, diferiții autori propun - a se vedea relațiile (1.34) - valori întru-

cîtve diferite.

Se pune deci problema stabilirii valorii λ_e care reflectă cel mai bine realitatea, problemă care se va lua în considerare ulterior.

1.4.2. Parametrii proprii ai coliviei de lucru.

Rezistența R_i' se calculează cu relația :

$$R_i' = k \left[\rho_{b_i} \frac{L_{b_i}}{q_{b_i}} + \rho_{i_{ni}} \frac{L_{i_{ni}}}{q_{i_{ni}}} \cdot \frac{1}{2 \sin^2 \frac{p\pi}{N c_2}} \right] \quad (1.36)$$

dacă inelele de scurtcircuitare sînt separate, respectiv cu relația :

$$R_i' = k \rho_{b_i} \frac{L_{b_i}}{q_{b_i}} \quad (1.37)$$

dacă inelele de scurtcircuitare sînt comune.

În cazul în care cele două colivii se execută din același material (cupru ; aluminiu), atunci :

$$\rho_{b_e} = \rho_{b_i} = \rho_b, \text{ respectiv}$$

$$\rho_{i_{n_e}} = \rho_{i_{n_i}} = \rho_i = \rho_b$$

Reactanța X_i' se determină cu relațiile :

$$X_i' = k 2\pi f_1 \mu_0 L_i \lambda_i + X_{f_i}' \quad (1.38)$$

sau :

$$X_i' = X'_{crest} = k \cdot 2\pi f_1 \mu_0 L_i \lambda_i \quad (1.39)$$

În funcție de tipul inelelor de scurtcircuitare.

Permeanța specifică de crestătură λ_i a coliviei de lucru se poate exprima sub forma :

$$\lambda_i = \lambda_i^* + \frac{h}{b} + \lambda_e^* \quad (1.40)$$

unde λ_i^* depinde de forma și dimensiunile creștăturii coliviei de lucru, h și b sînt dimensiunile istmului dintre cele două creștături (Figura 1.13), iar λ_e^* este contribuția creștăturii sau coliviei de pornire la permeanța globală a creștăturii coliviei de lucru.

Pentru permeanțele λ_i^* și λ_e^* (ca și în cazul permeanței λ_e), diferenții autori propun relații (sau valori) mai mult sau mai puțin diferite, funcție și de forma barei (creștăturii) coliviei de lucru, respectiv a formei barei coliviei de pornire.

Pentru λ_i^* se propun următoarele relații de calcul sau valori :

$$a) \lambda_i^* = \frac{h_i}{3b_i} \quad (1.41 a)$$

dacă bara de lucru are secțiune dreptunghiulară⁵ :

$$b) \lambda_i^* \approx \frac{2h_i}{3(d_1 + d_2)} + 0,66 \quad (1.41 b)$$

sau

$$\lambda_i^* \approx \frac{2h_i}{3(d_1 + d_2)} + 0,62 \quad (1.41 b')$$

dacă bara de lucru are secțiune ovală³⁷ ca în Figura 1.13 b).

$$\begin{aligned} c) \lambda_i^* &= 0,66^5 \\ \lambda_i^* &= 0,63^{32} \\ \lambda_i^* &= 0,623^{37} \end{aligned} \quad (1.41 c)$$

dacă bara de lucru are secțiune rotundă.

Pentru permeanța λ_e^* se consideră⁵ :

$$\lambda_e^* = 1,32 \quad (1.42)$$

respectiv este considerată nulă^{32,37}. Altă relație propusă este³⁴:

$$\lambda_i^* + \lambda_e^* = 1,4 \quad (1.45)$$

în cazul în care bara de lucru are o formă oarecare, iar bara de pornire este rotundă.

Se face observația⁵ că în mod exact, permeanța λ_e^* corespunde relației :

$$\lambda_e^* = \arcsin \sqrt{1 - \left(\frac{b_4}{d_e}\right)^2} \quad (1.46)$$

ea rezultînd practic egală cu 1,32 - dată de relația (1.42) - cînd

$$\frac{1}{5} < \frac{b_4}{d_e} < \frac{1}{3}$$

Relațiile prezentate pentru calculul parametrilor coliviei de lucru arată că :

- a) rezistența $R_1^!$ este cu atît mai mică cu cît secțiunea barelor și a inelelor sînt mai mari ;
- b) reactanța $X_1^!$ este determinată în principal de dimensiunile h și b ale interstițiului dintre creștăturile celor două colivii comune ;
- c) trebuie reținută diversitatea relațiilor de calcul sau a valorilor permeanțelor λ_e^* și λ_i^* recomandate de diferiții autori, chiar și în cazul aceleiași forme de creștătură - vezi relațiile (1.34), (1.41 a,b,c) și (1.45).

Este evident că situația reală nu poate corespunde decît uneia dintre aceste relații (valori) sau chiar uneia intermediară. O problemă de rezolvat rămîne deci și stabilirea relațiilor (valorilor) care definesc corect permeanțele respective. O altă problemă este stabilirea relației (valorii) pentru determinarea lui λ_e^* - pentru cazul barelor rotunde - respectiv pentru determinarea lui λ_i^* - în special ($\lambda_i^* \gg \lambda_e^*$, avînd o preponderență mult mai mare). La rotoarele în dublă colivie turnate în aluminiu, care au în realitate creștături rotorice unice de o formă particulară, se pune chiar problema stabilirii unei relații de calcul al permeanței întregii creștături respective, pe care o voi nota cu λ_{cr2} .

1.4.3. Parametrii comuni ai celor două colivii.

Cele două colivii prezintă o rezistență comună, după cum s-a arătat, numai în cazul în care inelele de pe cele două părți ale rotorului scurtcircuitează simultan barele coliviei de pornire și pe cele ale coliviei de lucru. Ea este reprezentată în această situație chiar de rezistența acestor inele, care cu notațiile obișnuite este dată de următoarea relație :

$$R'_{c_2} = k \cdot \rho_{i_n} \frac{L_{i_n}}{q_{i_n}} \cdot \frac{1}{2 \sin^2 \frac{\pi p}{N_{c_2}}} \quad (1.47)$$

Această componentă a rezistenței rotorice, ca la orice înfășurare în colivie, este de obicei mult mai mică decât rezistența barei, astfel încît în relația :

$$R'_2 = R'_{c_2} + R'_{E_2} \quad (1.48)$$

componenta principală a rezistenței rotorice R'_2 este R'_{E_2} . În cazul inelelor de scurtcircuitare separate, $R'_{c_2} = 0$.

În ceea ce privește reactanțele care intră în componenta reactanței comune ambelor înfășurări, reactanța de dispersie diferențială este indicat să se determine cu relația :

$$X'_{d_2} = k \cdot \sigma_{d_2} \cdot X'_{m_2} \approx \sigma_{d_2} X_{m_1} \quad (1.49)$$

unde prin X_{m_1} și X'_{m_2} s-au notat reactanțele de magnetizare statorică, respectiv rotorică, redusă la stator. Factorul de proporționalitate :

$$\sigma_{d_2} = \left(\frac{1}{\kappa_2 k_{i_2}} \right)^2 - 1 \quad (1.50)$$

depinde de numărul de creștături rotorice și de numărul de poli prin intermediul factorului :

$$\kappa_2 = \frac{N_{c_2}}{\pi p} \sin \frac{\pi p}{N_{c_2}} \quad (1.51)$$

respectiv de factorul de înclinare a barelor rotorice :

$$k_{i_2} = \frac{2\tau}{\pi b} \sin \frac{\pi b}{2\tau} \quad (1.52)$$

unde b este înclinarea măsurată în direcție axială pe suprafața exterioară a rotorului. De fapt, k_{i_2} reprezintă în acest caz "factorul de bobinaj rotoric", notat anterior cu k_{b_2} .

Factorul σ_{d_2} , avînd valori cuprinse între limitele (0,001 - 0,01), reactanța de dispersie diferențială a rotorului în dublă colivie este în mod obișnuit de valoare mai mult sau mai puțin redusă. Trebuie observat că dacă se alege o înclinare a barelor, chiar redusă, reactanța X'_{d_2} poate crește relativ mult, ceea ce în unele cazuri este dezavantajos. Înclinarea barelor, însă, prezintă importanță (efect pozitiv) privind anihilarea cuplurilor parazite.

Reactanța de dispersie $X'_{d_{c_2}}$ corespunzătoare deschiderii creșterii rotorice este dată de relația :

$$X'_{d_{c_2}} = k \cdot 2\pi f_1 \mu_0 l_i \lambda_{d_{c_2}} \quad (1.53)$$

unde :

$$\lambda_{d_{c_2}} = \frac{h_4}{b_4} \quad (1.54)$$

Valoarea reactanței $X'_{d_{c_2}}$ este prin urmare cu atât mai mică, cu cît h_4 are o valoare mai redusă iar b_4 o valoare mai mare.

De obicei, în comparație cu X'_{d_2} , această reactanță este mult mai mică ($\lambda_{d_{c_2}}$ - mică).

Suma $X'_{d_2} + X'_{d_{c_2}}$ reprezintă reactanța comună X'_{c_2} a celor două colivii în cazul în care inelele de scurtcircuitare sînt separate. Cînd inelele de scurtcircuitare sînt comune ambelor colivii, în componența lui X'_{c_2} intră și reactanța frontală (a inelelor respective).

Reactanța $X'_{f_{c_2}}$ se poate determina cu relațiile recomandate în literatură. La motoarele turnate în aluminiu, la care inelele sînt lipite de miez, valoarea pentru $X'_{f_{c_2}}$ rezultă mică chiar și în raport cu reactanțele X'_{d_2} și $X'_{d_{c_2}}$, motiv pentru care reactanța $X'_{f_{c_2}}$ se poate neglija în calculele care nu cer o exactitate deosebită.

La un calcul riguros al parametrilor este însă indicat a se ține seama și de X'_f .

Reactanța de dispersie mutuală se calculează cu relație :

$$X' = k \cdot 2\pi f_1 \mu_0 L_i \lambda' \quad (1.55)$$

în care :

$$\lambda' = \frac{h_e}{2b_e} \quad \text{sau} \quad \lambda' = \frac{\pi}{4} \quad (1.56)$$

după cum creșterea coliviei de pornire este dreptunghiulară sau circulară^{5,37}.

1.5. Relațiile dintre parametrii proprii ai coliviilor și parametrii echivalenți nominali.

La proiectarea motoarelor în dublă colivie prezintă un real interes relațiile de dependență a parametrilor proprii celor două colivii de parametrii rotorici nominali și de pornire.

Notînd, așa cum s-a făcut anterior, cu α raportul $\alpha = R'_1/R'_e < 1$, din relația (1.25) rezultă că rezistența coliviei exterioare poate fi exprimată sub forma :

$$R'_e = \frac{1 + \alpha}{\alpha} R'_{E_{2n}} \quad (1.57)$$

iar cea a coliviei interioare, sub forma :

$$R'_i = (1 + \alpha) R'_{E_{2n}} \quad (1.58)$$

În cazul reactanțelor X'_e și X'_i , lucrurile se complică, întrucît, în plus față de raportul α , trebuie ținut seama, în principiu, și de rapoartele :

$$\gamma = X'_e/X'_i \quad \text{și} \quad \delta = X'/X'_i$$

Întrucît reactanțele X'_e și X' sînt realmente mult mai mici decît reactanța X'_i , practic toți autorii propun neglijarea lor în raport cu reactanța coliviei interioare. În acest caz, cînd la numărătorul expresiei (1.26) rămîne doar primul termen, rezultă că

reactanța coliviei de lucru depinde de reactanța echivalentă $X'_{E_{2n}}$ conform relației :

$$X'_1 \approx \frac{(R'_e + R'_1)^2}{R_e'^2} X'_{E_{2n}} \approx (1 + \alpha)^2 X'_{E_{2n}} \quad (1.59)$$

Valoarea riguros corectă a reactanței X'_1 , care ține seama și de reactanța X'_e ca și de X'_1 este, după cum se poate deduce din aceeași relație (1.26) :

$$X'_1 = (1 + \alpha)^2 X'_{E_{2n}} - \alpha(\alpha X'_e + 2 X') \quad (1.60)$$

Analizând relațiile determinate mai sus se constată că, cu excepția reactanței X'_e , parametrii principali ai celor două colivii depind de parametrii nominali rotorici și de valoarea factorului α , ceea ce evidențiază încă odată importanța alegerii potrivite a acestei mărimi.

1.6. Relațiile de interdependență între parametrii rotorici de pornire și cei nominali.

Relațiile stabilite anterior : (1.25), (1.26) și (1.27), (1.28) arată că între rezistențele $R'_{E_{2p}}$ și $R'_{E_{2n}}$, respectiv între reactanțele $X'_{E_{2p}}$ și $X'_{E_{2n}}$ ale unui rotor în dublă colivie există anumite relații bine determinate, rigide.

Neglijând efectul pelicular la pornire din barele coliviei de lucru, exprimând în relațiile (1.25)-(1.28) pe R'_e , R'_1 și X'_1 sub formele (1.57), (1.58) și (1.59) și făcând calculele intermediare, se obțin următoarele relații de interdependență între rezistențele și respectiv reactanțele echivalente de la pornire și respectiv în sarcina nominală.

Expresiile obținute, (1.61) și (1.62), corespund situației în care nu se ține seama de influența efectului pelicular de la pornire din barele coliviei de lucru.

$$R'_{E_{2p}} = R'_{E_{2n}} + \frac{R'_{E_{2n}} X'_{E_{2n}}{}^2 \left[1 - \frac{X'_e + (1 - \alpha)X'}{(1 + \alpha)^2 X'_{E_{2n}}} \right]^2}{R'_{E_{2n}}{}^2 + X'_{E_{2n}}{}^2 \left[1 - \frac{2X' - X'_e}{(1 + \alpha)^2 X'_{E_{2n}}} \right]^2} \quad (1.61)$$

$$X'_{E_{2p}} = X'_{E_{2n}} - \frac{\alpha^2 X'_{E_{2n}}{}^3 \left[1 - \frac{2X' - X'_e}{(1 + \alpha)^2 X'_{E_{2n}}} \right] \left[1 - \frac{\alpha X'_e + (1 - \alpha)X'}{(1 + \alpha)^2 X'_{E_{2n}}} \right]^2}{R'_{E_{2n}}{}^2 + \alpha X'_{E_{2n}}{}^2 \left[1 - \frac{2X' - X'_e}{(1 + \alpha)^2 X'_{E_{2n}}} \right]} \quad (1.62)$$

Dacă se consideră $X'_e \approx 0$ și $X' \approx 0$, se obțin relațiile mai simple (dar mai puțin exacte):

$$R'_{E_{2p}} = R'_{E_{2n}} + \frac{\alpha R'_{E_{2n}} X'_{E_{2n}}{}^2}{R'_{E_{2n}}{}^2 + \alpha^2 X'_{E_{2n}}{}^2} \quad (1.63 \text{ a})$$

$$X'_{E_{2p}} = X'_{E_{2n}} - \frac{\alpha^2 X'_{E_{2n}}{}^3}{R'_{E_{2n}}{}^2 + \alpha^2 X'_{E_{2n}}{}^2} \quad (1.64 \text{ a})$$

În cazul în care se ia în considerare efectul pelicular din barele coliviei de lucru la pornire, relațiile dintre $R'_{E_{2p}}$ și $R'_{E_{2n}}$, respectiv dintre $X'_{E_{2p}}$ și $X'_{E_{2n}}$ rezultă ceva mai complicate. Astfel, în condițiile menținerii ipotezei că $X'_e \approx 0$, $X' \approx 0$, se obțin relațiile (1.63) și (1.64) în care k_R și k_X sînt coeficienții ce afectează valorile lui R'_1 și X'_1 ca urmare a refulării de curent, la pornire, în barele coliviei de lucru.

$$R'_{E_{2p}} = R'_{E_{2n}} + \frac{k_X^2 \alpha (1 + \alpha)^2 R'_{E_{2n}} X'_{E_{2n}}{}^2}{(1 + k_R \alpha)^2 R'_{E_{2n}}{}^2 + k_X^2 \alpha^2 (1 + \alpha)^2 X'_{E_{2n}}{}^2} +$$

$$\frac{[k_R (1 + k_R \alpha) (1 - \alpha) - (1 + k_R \alpha)^2] R'_{E_{2n}}{}^3}{(1 + k_R \alpha)^2 R'_{E_{2n}}{}^2 + k_X^2 \alpha^2 (1 + \alpha)^2 X'_{E_{2n}}{}^2} \quad (1.63)$$

$$X'_{E_{2p}} = X'_{E_{2n}} - \frac{k_X^2 \alpha^2 (1 + \alpha)^2 X'_{E_{2n}}{}^3}{(1 + k_R \alpha)^2 R'_{E_{2n}}{}^2 + k_X^2 \alpha^2 (1 + \alpha)^2 X'_{E_{2n}}{}^2} -$$

$$\frac{\alpha^2 R'_{E_{2n}}{}^2 X'_{E_{2n}}{}^2 [(1 + k_R \alpha)^2 - k_X (1 + \alpha)^2]}{(1 + k_R \alpha)^2 R'_{E_{2n}}{}^2 + k_X^2 \alpha^2 (1 + \alpha)^2 X'_{E_{2n}}{}^2} \quad (1.64)$$

Relațiile dintre rezistențele globale R'_{2p} și R'_{2n} , respectiv dintre reactanțele globale X'_{2p} și X'_{2n} , rezultă :

$$R'_{2p} = R'_{c_2} + R'_{E_{2p}} \quad (1.65)$$

$$X'_{2p} = X'_{c_{2s}} + X'_{E_{2p}} \quad (1.66)$$

unde $R'_{E_{2p}}$ și $X'_{E_{2p}}$ se exprimă sub una dintre formele stabilite mai sus, în funcție de ipotezele admise.

Se menționează că $X'_{c_{2s}}$ reprezintă valoarea saturată (la pornire) a acestei reactanțe, mai mică decât valoarea nesaturată X'_{c_2} . Calculul acestei reactanțe, când reactanța X'_{c_2} este cunoscută, este precizat în literatură⁵.

Relațiile între parametrii $R'_{E_{2p}}$, $R'_{E_{2n}}$, $X'_{E_{2p}}$ și mărimea α

scot în evidență faptul că unul dintre acești parametri are o valoare determinată în mod univoc când celelalte trei au valori precizate. În consecință, dacă la dimensionarea motorului se prevăd anumite valori pentru m_p și i_p (care determină valorile pe care trebuie să le aibă $R'_{E_{2p}}$ și $X'_{E_{2p}}$), valorile ce se impun randamentului sau factorului de putere nominal (dependente de valorile lui $R'_{E_{2n}}$ și $X'_{E_{2n}}$), trebuie corelate, în concordanță cu dependențele evidentiate de relațiile (1.61), (1.62) sau (1.63) și (1.64).

Fixarea în mod arbitrar (necorelat) a valorilor impuse simultan pentru m_p , i_p , η_n și $\cos \varphi_n$ este iluzorie, ele neputînd fi realizate toate, simultan, pentru că în aceste condiții se face abstracție de legăturile "rigide" dintre parametrii rotorici de pornire și nominali, respectiv mărimea α .

1.7. Factorul de majorare al rezistenței și de micșorarea reactanței rotorice la pornire.

Reactanța de dispersie comună X'_{c_2} fiind în general de valoare relativ modestă, iar rezistența comună R'_{c_2} nefiind influențată de saturația care intervine la $s = 1$, creșterea rezistenței rotorice și micșorarea reactanței rotorice la pornirea motorului în dublă colivie sînt determinate în principal de modificările care privesc parametrii echivalenți R'_{E_2} și X'_{E_2} .

Pentru a analiza măsura în care au loc aceste modificări de obicei se admite ipoteza simplificatoare că $X'_e = 0$, $X' = 0$. În aceste condiții factorul de creștere al rezistenței R'_{E_2} în raport cu valoarea sa nominală, $R'_{E_{2n}}$, rezultă - a se vedea relațiile (1.61 a) și (1.61 b) :

$$k_{R_p} = \frac{R'_{E_{2p}}}{R'_{E_{2n}}} \approx 1 + \frac{\alpha X'^2_{E_{2n}}}{R'^2_{E_{2n}} + \alpha^2 X'^2_{E_{2n}}} \quad (1.67)$$

iar factorul de reducere al reactanței $X'_{E_{2p}}$ față de valoarea sa nominală, $X'_{E_{2n}}$ este :

$$k_{x_p} = \frac{X'_{E_{2n}}}{X'_{E_{2n}}} \approx 1 - \frac{\alpha^2 X'^2_{E_{2n}}}{R'^2_{E_{2n}} + \alpha^2 X'^2_{E_{2n}}} \quad (1.68)$$

După cum rezultă din relația (1.67), factorul de creștere al rezistenței rotorice la pornire a motorului în dublă colivie devine maxim când :

$$\alpha = \alpha_m = \frac{R'_{E_{2n}}}{X'_{E_{2n}}} \quad (1.69)$$

Ținînd seama de relația (1.69), valoarea maximă a factorului k_{R_p} , rezultă :

$$k_{R_{p_m}} = 1 + \frac{X'_{E_{2n}}}{2R'_{E_{2n}}} \quad (1.70)$$

În acest caz, factorul de reducere a reactanței rotorice rezultă, introducînd în (1.68) pe α cu valoarea dată de (1.69) de valoarea fixă :

$$k_{x_{p_m}} = \frac{1}{2} \quad (1.71)$$

Este însă de subliniat că, mai ales la motoarele cu măriți de pornire pretentioase (dar și la motoarele în dublă colivie uzuale), raportul $R'_{E_{2n}}/X'_{E_{2n}} \ll 1$, astfel încît factorul k_{R_p} care intervine în realitate este mult mai mic decît $k_{R_{p_{max}}}$, care reprezintă o mărime ideală care nu se obține practic la acest tip de motoare.

CAPITOLUL II.MĂRIMILE FUNCȚIONALE ALE MOTORULUI CU ROTOR
IN DUBLA COLIVIE SI DEPENDENTA PARAMETRILOR
ROTORICI DE MĂRIMILE DE PORNIRE (M_p, I_p).2.1. Mărimile funcționale ale motorului cu rotorul în
dublă colivie.

Mărimile funcționale ale motorului cu rotorul în dublă colivie se determină cu relațiile general valabile pentru orice motor de inducție, ținând seama de particularitățile determinate de construcția specială a rotorului, conform celor prezentate anterior.

Cuplul pe care îl dezvoltă motorul de inducție cu rotorul în dublă colivie, ca și în cazul oricărui motor de inducție, se poate exprima sub forma :

$$M = \frac{m_1 R_2' I_2'^2}{s \Omega_1} \quad (2.1)$$

unde, la alunecări mici,

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + C_1 \frac{R_2'_n}{s})^2 + (X_1 + C_1 X_{2'_n}')^2}} \quad (2.2)$$

(R_2' și X_2' , la s apropiat sau egal cu s_n , practic sînt egali cu $R_{2'_n}'$ și $X_{2'_n}'$).

La motoarele de putere medie și mare, mărimea $C_1 \approx 1 + X_1/X_{m_1} \approx 1,02 - 1,03$.

Expresiile cuplului M_n și curentului $I_{2'_n}'$ se obțin considerînd în relațiile (2.1) și (2.2) alunecarea $s = s_n$.

Expresia cuplului de răsturnare M_k rezultă tot din relația (2.1) observînd că la valorile obișnuite ale alunecării de răsturnare $s_k = 0,15 - 0,25$; se poate considera că :

$$R'_{2k} \approx R'_{2n} \quad (2.3)$$

$$X'_{2k} \approx X'_{2n} \quad (2.4)$$

și deci cuplul de răsturnare poate fi exprimat ca fiind :

$$M_k = \frac{m_1 R'_{2n} I'_{2k}{}^2}{s_k \Omega_1} \quad (2.5)$$

unde alunecarea corespunzătoare acestui cuplu este :

$$s_k = \frac{C_1 R'_{2n}}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + C_1 X'_{2n})^2}} \quad (2.6)$$

Curentul rotoric corespunzător este dat de relația :

$$I'_{2k} = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + C_1 \frac{R'_{2n}}{s_k})^2 + (X_1 + C_1 X'_{2n})^2}} \quad (2.7)$$

Ținând seama de relațiile (2.6) și (2.7) expresia cuplului de răsturnare rezultă de forma :

$$M_k = \frac{m_1}{2C_1 \Omega_1} \cdot \frac{U_1^2}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + C_1 X'_{2n})^2}} \quad (2.8)$$

Aprecierea stabilității statice a motoarelor asincrone se evidențiază prin valoarea cuplului de răsturnare relativ :

$m_k = M_k / M_n$. Introducând notația :

$$i_{2k} = \frac{I'_{2k}}{I'_{2n}} = \sqrt{\frac{(R_1 + C_1 \frac{R'_{2n}}{s_n})^2 + (X_1 + C_1 X'_{2n})^2}{(R_1 + C_1 \frac{R'_{2n}}{s_k})^2 + (X_1 + C_1 X'_{2n})^2}} \quad (2.9)$$

cuplul de răstunare relativ rezultă :

$$m_k = \frac{m_1 R_2' I_{2k}'^2}{s_k \Omega_1} \cdot \frac{s_n \Omega_1}{m_1 R_2' I_{2n}'^2} = \frac{s_n}{s_k} i_{2k}'^2 \quad (2.10)$$

unde $i_{2k}' = I_{2k}' / I_{2n}'$ este curentul rotoric relativ la $s = s_k$.

În cazul motoarelor în dublă colivie cu mărimi de pornire pretențioase, datorită variației parametrilor funcție de alunecare mai complexă, relațiile de calcul (2.6) și (2.5) ale alunecării s_k și cuplului M_k , ca și relația lui m_k duc însă doar la valori informative.

2.2. Mărimile de pornire ale motorului cu rotorul în dublă colivie.

Valoarea cuplului de pornire corespunzând la $s = 1$, la care $R_2' = R_{2p}'$, $X_2' = X_{2p}'$, $I_2' = I_{2p}'$ din relația (2.1) rezultă expresia cuplului de pornire sub forma :

$$M_p = \frac{m_1 R_{2p}' I_{2p}'^2}{\Omega_1} \quad (2.11)$$

în care :

$$I_{2p}' = \frac{U_1^2}{\sqrt{(R_1 + C_{1s} R_{2p}')^2 + (X_{1s} + C_{1s} X_{2p}')^2}} \quad (2.12)$$

Constanta :

$$C_{1s} = 1 + \frac{X_{1s}}{X_{m1}} \quad (2.13)$$

unde X_{1s} este reactanța saturată de dispersie a statorului.

Reactanța :

$$X_{2p}' = X_{c2s}' + X_{E2p}' \quad (2.14)$$

unde X_{c2s}' este valoarea reactanței comune în condiții de saturație

(la pornire)

În continuare, valorile saturate la pornire ($s = 1$) ale mărimilor afectate de acest fenomen se vor nota avînd asociat indicele s .

Introducînd noțiunea de curent rotoric de pornire relativ :

$$i_{2p} = \frac{I'_{2p}}{I'_{2n}} = \sqrt{\frac{(R_1 + C_1 \frac{R'_{2n}}{s_n})^2 + (X_1 + C_1 X'_{2n})^2}{(R_1 + C_{1s} R'_{2p})^2 + (X_{1s} + C_{1s} X'_{2p})^2}} \quad (2.15)$$

cuplul de pornire relativ se poate exprima sub forma :

$$m_p = \frac{m_1 R'_{2p} I'_{2p}{}^2}{\Omega_1} \cdot \frac{s_n \Omega_1}{m_1 R'_{2n} I'_{2n}{}^2} = s_n \cdot \frac{R'_{2p}}{R'_{2n}} \cdot i_{2p}^2 \quad (2.16)$$

Indicele de calitate al pornirii, referitor la rotor, este definit, de exemplu⁶, ca fiind :

$$g_{2p} = \frac{m_p}{i_{2p}} = s_n \frac{R'_{2p}}{R'_{2n}} i_{2p} \quad (2.17)$$

2.3. Dependența parametrilor rotorici de mărimile de pornire.

Dimensionarea rațională a rotorului unui motor în dublă colivie, cînd sînt impuse mărimile de pornire și cînd este de dorit respectarea lor cît mai fidelă, implică cunoașterea relațiilor de dependență a parametrilor rotorici de mărimile de pornire, care să permită stabilirea valorilor necesare ale acestor parametri, care trebuie realizate în funcție de aceste valori; urmează să se determine ulterior parametrii proprii necesari fiecărei colivii, precum și parametrii lor comuni, proiectarea rotorului urmînd a se executa astfel încît să se obțină colivii de parametri cît mai apropiate de cei necesari.

Problema dimensionării rotorului în modul menționat prezintă un interes cu totul deosebit în cazul motoarelor de inducție în dublă colivie și cu mărimi de pornire pretențioase, la care aceste mărimi trebuie asigurate cu prioritate.

Această problemă a fost analizată într-o serie de lucrări relativ recente²⁴⁻²⁹, studiindu-se diverse aspecte ale ei. În cele ce urmează se prezintă rezultatele privind modul în care se propune a se stabili parametrii R'_{2p} , X'_{2p} , R'_{2n} , X'_{2n} și factorul $\alpha = R'_1/R'_e$, necesari pentru a se obține mărimile de pornire m_p și i_p , măsura în care ei sînt influențați de valorile concrete ale lui m_p și i_p , schițîndu-se în final felul în care se determină, pe baza mărimilor amintite, configurația celor două colivii.

Se menționează că rezultatele care sînt prezentate sînt valabile în ipoteza că :

a) reactanțele X'_e și X' sînt neglijabile în raport cu ceilalți parametri ;

b) R_1 este neglijabil față de R'_{2p} .

Notînd cu $i_{p2} \cong (1,07 - 1,25)i_p$ curentul de pornire rotoric relativ și cu P_{in} și P_m puterea interioară (electromagnetică) nominală și puterea mecanică totală corespunzătoare, mărimile caracteristice de pornire se pot exprima sub forma²⁴ :

$$m_p = \frac{m_1 R'_{2p} I_{2p}'^2}{P_{in}} = (1 - s_n) \frac{m_1 R'_{2p} I_{2p}'^2}{P_m} \quad (2.18)$$

unde I_{2p}' are expresia (2.12).

Pornind de la expresia puterii electromagnetice, se poate deduce că curentul I_{2n}' poate fi exprimat și sub forma convenabilă pentru analiza tematicii în discuție :

$$I_{2n}' = \frac{P_{in}}{m_1 U_{e1n} \cos \psi_{2n}} = \frac{C_1}{m_1 U_1 \cos \psi_{2n}} \cdot \frac{P_m}{1 - s_n} \quad (2.19)$$

$$\text{în care } C_1 \cong \frac{1}{k_e} = \frac{U_1}{U_{e1}}$$

În același timp, curentul I_{2n}' este legat de parametrii nominali ai înfășurărilor prin relația :

$$I'_{2n} = \frac{U_{1n}}{\sqrt{(R_1 + C_1 \frac{R'_{2n}}{s_n})^2 + (X_1 + C_1 X'_{2n})^2}} \quad (2.20)$$

Pe de altă parte, între rezistențele R'_{2p} și R'_{2n} există relația determinată - a se vedea relația (2.16) :

$$s_n R'_{2p} i_{2p}^2 = R'_{2n} m_p \quad (2.21)$$

Conform relației (2.21), rezultă că rezistența necesară la pornire este :

$$R'_{2p} = \frac{m_p}{i_{2p}^2} \cdot \frac{R'_{2n}}{s_n} \quad (2.22)$$

Pentru că R'_{2n} nu este în prima fază cunoscut, este mai indicat a se folosi, pentru stabilirea lui R'_{2p} , relația (2.18), după care:

$$R'_{2p} = m_p \frac{P_m}{m_1} \cdot \frac{1}{I_{2p}'^2} = \frac{m_p}{i_{p2}^2} \cdot \frac{P_m}{m_1} \cdot \frac{1}{I_{2n}'^2} \quad (2.23)$$

Avînd în vedere expresia lui I_{2n}' - relația (2.19) - rezultă relația de calcul practică :

$$\begin{aligned} R'_{2p} &= \frac{m_p}{i_{p2}^2} \cdot \frac{m_1}{P_{i_n}} (U_{e1} \cos \psi_{2n})^2 = \\ &= \frac{m_p}{i_{p2}^2} \cdot \frac{m_1}{P_m} \left(\frac{U_1 \cos \psi_{2n}}{C_1} \right)^2 (1 - s_n) \end{aligned} \quad (2.24)$$

(puterea mecanică la arbore fiind $P_m = P_{i_n} / (1 - s_n)$)

Relația (2.24) are avantajul că aproximînd pe $C_1 = 1,02 - 1,03$, pe s_n și pe $\cos \psi_{2n}$ (care este dat de expresia (2.25))

$$\cos \psi_{2n} = \frac{1}{\sqrt{1 + s_n^2 (X'_{2n} / R'_{2n})^2}} \quad (2.25)$$

se poate stabili o valoare preliminară practic corectă pentru R'_{2p} .

Dacă în cazul motoarelor de serie, $\cos \psi_{2n}$ are o valoare foarte apropiată de unitate, la motoarele cu mărimi de pornire pretențioase, la care X'_{2n} este mult sporită, valoarea lui $\cos \psi_{2n}$ se reduce la valori de ordinul $\cos \psi_{2n} \approx 0,94 \div 0,96$.

Introducînd în relația (2.15) expresia lui I'_{2n} dată de (2.19), pentru curentul rotor de pornire se obține relația :

$$I'_{2p} = i_{2p} I'_{2n} = \frac{m_p}{i_{2p}} \cdot \frac{U_1 \cos \psi_{2n}}{C_1 R'_{2p}} \quad (2.26)$$

unde R'_{2p} este dat de (2.24).

Reactanța X'_{2p} corespunde impedanței echivalente de pornire și rezistențelor R_1, R'_{2p} , respectiv reactanței statorice saturate X_{1s} . Făcînd calculele intermediare, rezultă pentru X'_{2p} relația :

$$X'_{2p} \approx \sqrt{\left(\frac{i_{2p}}{m_p} \cdot \frac{R'_{2p}}{\cos \psi_{2n}}\right)^2 - \left(\frac{R_1}{C_{1s}} + R'_{2p}\right)^2} - \frac{X_{1s}}{C_{1s}} \quad (2.27)$$

Expresia reactanței X'_{2p} scoate în evidență că pentru a putea dimensiona motorul astfel încît el să prezinte mărimile de pornire impuse, acestea trebuie să fie de asemenea valori încît să fie satisfăcute inegalitățile :

$$\frac{i_{2p}}{m_p} \cdot \frac{R'_{2p}}{\cos \psi_{2n}} > \frac{R_1}{C_{1s}} + R'_{2p} \quad (2.28)$$

$$\left(\frac{i_{2p}}{m_p} \cdot \frac{R'_{2p}}{\cos \psi_{2n}}\right)^2 > \left(\frac{R_1}{C_{1s}} + R'_{2p}\right)^2 + \frac{X_1^2}{C_{1s}^2} + X'_{2p} \quad (2.29)$$

În funcție de rezistența R'_{2p} , conform relației (2.21), rezistența rotorică nominală necesară poate fi determinată cu relația :

$$R'_{2n} = R'_{2p} s_n \frac{i_{2p}^2}{m_p} \quad (2.30)$$

Rezistențele echivalente ale coliviilor considerate conectate în paralel rezultă (a se vedea (1.65), (1.66)) :

$$R'_{E_{2p}} = R'_{2p} - R'_{c_2} \quad (2.31)$$

$$R'_{E_{2n}} = R'_{2n} - R'_{c_2} \quad (2.32)$$

(admițînd că rezistența inelelor de scurtcircuitare, deci R'_{c_2} este aceeași la pornire ca și în regim de lucru ; ipoteza este întrutotul admisibilă, avînd în vedere că, în condițiile în care avem $R'_{c_2} \ll R'_{E_{2n}}$ și $R'_{E_{2p}}$, chiar dacă la pornire în inele are loc o refluxare de curent, ea influențează insesizabil, practic, valoarea lui $R'_{E_{2p}}$).

La admiterea unei anumite deschideri a creștăturilor rotorice spre întrefier, conform indicațiilor din literatură, reactanța comună, ca valoare nesaturată, respectiv saturată, poate fi calculată ; ca urmare, cunoscînd valoarea necesară a reactanței X'_{2p} , dată de (2.27), rezultă pentru valoarea necesară a reactanței $X'_{E_{2p}}$ relația :

$$X'_{E_{2p}} = X'_{2p} - X'_{2c_s} \quad (2.33)$$

Valorile necesare ale reactanței $X'_{E_{2n}}$ și raportului α , în situația în care se cunosc $R'_{E_{2p}}$, $R'_{E_{2n}}$ și $X'_{E_{2p}}$, pot fi deduse ca

valori aproximative prin rezolvarea sistemului de două ecuații cu două necunoscute reprezentate de relațiile dintre $R'_{E_{2p}}$ și $R'_{E_{2n}}$, respectiv $X'_{E_{2p}}$ și $X'_{E_{2n}}$ - a se vedea relațiile (1.61 a) și (1.61 b).

Rezolvarea în raport cu α și $X'_{E_{2n}}$ a ecuațiilor (1.61) și (1.62), care implică cunoașterea în prealabil a reactanțelor X'_e și X' (de altfel, posibil de calculat), prezintă însă reale dificultăți, avînd în vedere că aceste ecuații sînt de grad superior lui 2, fiind în același timp și destul de complexe.

Deoarece, efectiv, reactanțele X'_e și X' sînt de valoare foarte redusă, ele se consideră neglijabile (zero)²⁴, și ca urmare sistemul de ecuații de luat în considerare sînt relațiile (1.61 a) și (1.61 b), amintite anterior. Soluțiile obținute prin rezolvarea acestui sistem de ecuații sînt :

$$X'_{E_{2n}} \approx \frac{(R'_{E_{2p}} - R'_{E_{2n}})^2}{X'_{E_{2p}}} + X'_{E_{2p}} \quad (2.34)$$

$$\alpha \approx \frac{R'_{E_{2p}} (R'_{E_{2p}} - R'_{E_{2n}})}{(R'_{E_{2p}} - R'_{E_{2n}})^2 + X'^2_{E_{2p}}} \quad (2.35)$$

Aceste ultime două relații nu sînt, evident, riguros exacte, și aceasta nu numai prin neglijarea reactanțelor X'_e și X' , ci și datorită faptului că, în tot ansamblul de relații considerat, nu se ține seama de efectul pelicular din barele coliviei, care are loc la $s = 1$. Ori, la motoarele de inducție în dublă colivie, cu mărimi de pornire pretențioase, efectul pelicular se manifestă sensibil. La neglijarea reactanțelor X'_e și X' , dar la luarea în considerare a acestui efect pelicular sînt valabile, cum s-a dedus, relațiile (1.63) și (1.64).

În aceste relații, ultimii termeni din membrul doi tind, după cum se observă, spre zero. Prin urmare :

$$\frac{R'_{E_{2p}} - R'_{E_{2n}}}{X'_{E_{2n}} - X'_{E_{2p}}} = \frac{R'_{E_{2n}}}{\alpha X'_{E_{2n}}}$$

de unde rezultă :

$$\alpha = \frac{R'_{E_{2n}}}{X'_{E_{2n}}} \cdot \frac{X'_{E_{2n}} - X'_{E_{2p}}}{R'_{E_{2p}} - R'_{E_{2n}}}$$

Introducînd această expresie a lui α în relația (1.63), în care în membrul doi se mențin doar primii doi termeni, după efectuarea calculelor intermediare, rezultă relația :

$$X'_{E_{2n}} - X'_{E_{2p}} = \frac{(R'_{E_{2p}} - R'_{E_{2n}})}{X'_{E_{2p}}} \cdot \frac{\left[X'_{E_{2n}} (R'_{E_{2p}} - R'_{E_{2n}}) + k_R R'_{E_{2n}} (X'_{E_{2n}} - X'_{E_{2p}}) \right]^2}{k_X^2 (X'_{E_{2n}} R'_{E_{2p}} - R'_{E_{2n}} X'_{E_{2p}})^2} \quad (2.37)$$

Ea reprezintă o ecuație de gradul 5, în care necunoscuta este $X'_{E_{2n}}$. Rezolvarea ei întîmpină mari dificultăți. În schimb, ea scoate în evidență că, în comparație cu valoarea lui $X'_{E_{2n}}$ dată de relația (2.34), la luarea în considerare a efectului pelicular la pornire, reactanța

$$X'_{E_{2n}} = k \frac{(R'_{E_{2p}} - R'_{E_{2n}})^2}{X'_{E_{2p}}} + X'_{E_{2p}} \quad (2.38)$$

unde :

$$k = \frac{\left[X'_{E_{2n}} (R'_{E_{2p}} - R'_{E_{2n}}) + k_R R'_{E_{2n}} (X'_{E_{2n}} - X'_{E_{2p}}) \right]^2}{k_X (X'_{E_{2n}} R'_{E_{2p}} - R'_{E_{2n}} X'_{E_{2p}})} \quad (2.39)$$

La valori $k_R \approx 1,2 - 1,3$ și $k_X = 0,9 - 0,94$, acest $k \approx 1,2 - 1,25$, ceea ce înseamnă că pentru $X'_{E_{2n}}$ este de recomandat a se folosi relația (2.38), care duce la rezultate mai apropiate de cele reale decît relația (2.34); de asemenea, o valoare mai

realistă a lui α se obține cu relația

$$\alpha = \frac{k R'_{E_{2n}} (R'_{E_{2p}} - R'_{E_{2n}})}{k(R'_{E_{2p}} - R'_{E_{2n}})^2 + X'^2_{E_{2p}}} \quad (2.40)$$

unde pentru k se alege o valoare aparținând intervalului amintit.

În sprijinul acestor ultime rezultate, se menționează că, fără să se demonstreze de ce, se propune⁵ pe baza unei justificări formale, considerarea reactanței X'_i , adică a reactanței $X'_{E_{2n}}$ cu 25% mai mare decât cea care rezultă cu relația (1.59).

2.4. Modul de variație al valorilor parametrilor rotorici necesari a se realiza în funcție de valorile impuse pentru mărimile de pornire.

Analiza relațiilor care definesc valorile parametrilor rotorici R'_2 , R'_{2n} , X'_{2p} , X'_{2n} (respectiv $R'_{E_{2p}}$, $R'_{E_{2n}}$, $X'_{E_{2p}}$, $X'_{E_{2n}}$) scoate

în evidență faptul că valorile acestor parametri depind în mod esențial de mărimile de pornire impuse, m_p și mai ales de i_p .

Studiul variației valorilor necesare ale acestor parametri în funcție de m_p și i_p prezintă prin urmare, în special la motoarele în dublă colivie cu mărimi de pornire pretențioase, un deosebit interes, atât sub aspectul consecințelor asupra comportării motorului în regim de lucru, cât și sub cel al posibilităților, de ordin constructiv, de realizare a coliviilor la dimensiunile necesare.

Rezultatele obținute în acest context în literatură²⁴ și completarea lor cu unele elemente în plus constituie obiectul acestui paragraf.

Vom analiza pentru început influența asupra parametrilor rotorici necesari a valorii impuse a cuplului m_p .

Notînd cu :

$$k = \frac{m_1 (k_e U_1 \cos \psi_{2n})^2}{P_m} (1 - s_n) \quad (2.41)$$

în care k_e și $\cos \psi_{2n}$, de valori mai mult sau mai puțin apropi-

ate de unitate, pot fi considerate practic constante pentru un motor de putere P_n și tensiune U_1 , iar $s_n \approx 0,04 \div 0,05$. În acest caz, parametrii rotorici stabiliți în paragraful precedent pot fi exprimați după cum urmează :

$$R'_{2p} = K \frac{m_p}{i_{2p}^2} ; R'_{2n} = K s_n \quad (2.42 \text{ a,b})$$

(a se vede relațiile (2.42) și (2.30)), respectiv,

$$X'_{2p} \approx \sqrt{\left(\frac{K}{i_{2p} \cos \psi_{2n}}\right)^2 - \left(\frac{K m_p}{i_{2p}^2}\right)^2} - \frac{X_{1s}}{C_{1s}}$$

Dacă se are în vedere relația (2.27), în care s-a neglijat R_1 , iar R'_{2p} s-a introdus sub forma (2.42 a), se obține pentru X'_{2p} forma mai practică :

$$X'_{2p} = K \frac{m_p}{i_{2p}^2} \sqrt{\left(\frac{i_{2p}}{m_p \cos \psi_{2n}}\right)^2 - 1} - \frac{X_{1s}}{C_{1s}} \quad (2.42 \text{ c})$$

În ceea ce privește reactanța X'_{2n} , folosind relația (2.34), în care R'_{2p} se introduce sub forma (2.42 a) și R'_{2n} sub forma (2.42b), rezultă :

$$X'_{2n} \approx \frac{K^2 \left(\frac{m_p}{i_{2p}^2} - s_n\right)^2}{X'_{2p}} + X'_{2p} \quad (2.42 \text{ d})$$

Dacă avem în vedere că $\cos \psi_{2n} \rightarrow 1$ și admitem că $X_{1s}/C_{1s} \approx X'_{2p}$ (aproximație admisibilă pentru obținerea unor concluzii de ordin calitativ), reactanțele X'_{2p} și X'_{2n} se pot exprima sub forma mai simplă :

$$X'_{2p} = \frac{K}{2} \cdot \frac{\sqrt{i_{2p}^2 - m_p^2}}{i_{2p}^2} \quad (2.42 \text{ e})$$

$$X'_{2n} = \frac{2Km_p^2}{i_{2p}^2 \sqrt{i_{2p}^2 - m_p^2}} + \frac{K}{2} \cdot \frac{\sqrt{i_{2p}^2 - m_p^2}}{i_{2p}^2} \quad (2.42 f)$$

(S-a considerat că $s_n \ll \frac{m_p}{i_{2p}^2}$).

Parametrii rotorici necesari, admitînd ipotezele amintite, se pot deci exprima după cum urmează :

$$R'_{2p} \approx K \frac{m_p}{i_{2p}^2}$$

$$R'_{2n} \approx K \cdot s_n$$

$$X'_{2p} \approx \frac{K}{2} \cdot \frac{\sqrt{i_{2p}^2 - m_p^2}}{i_{2p}^2}$$

(2.42)

$$X'_{2n} \approx \frac{2Km_p^2}{i_{2p}^2 \sqrt{i_{2p}^2 - m_p^2}} + \frac{K}{2} \cdot \frac{\sqrt{i_{2p}^2 - m_p^2}}{i_{2p}^2}$$

Se consideră că relațiile (2.42) și Figura 2.1 a), în care sînt reprezentate grafic curbele R'_{2p} , R'_{2n} , X'_{2p} și X'_{2n} în funcție de m_p , la un anumit curent i_{2p} dat, scot în evidență următoarele:

- 1) Rezistența R'_{2n} nu depinde de valoarea lui m_p , decît prin influența acestei mărimi asupra alunecării s_n .
- 2) Rezistența R'_{2p} crește odată cu m_p și anume practic liniar.
- 3) Reactanța X'_{2n} variază aproximativ patrativ cu m_p , avînd valori mult mai mari decît R'_{2n} , mai ales că și numitorul primului termen din membrul doi scade rapid cu creșterea lui m_p .
- 4) Reactanța X'_{2p} , pentru valori ce vin în considerare pen-

tru i_{2p} , are o variație în funcție de m_p nesemnificativă; valoarea sa este de ordinul de mărime al lui R'_{2p} sau chiar mai mică.

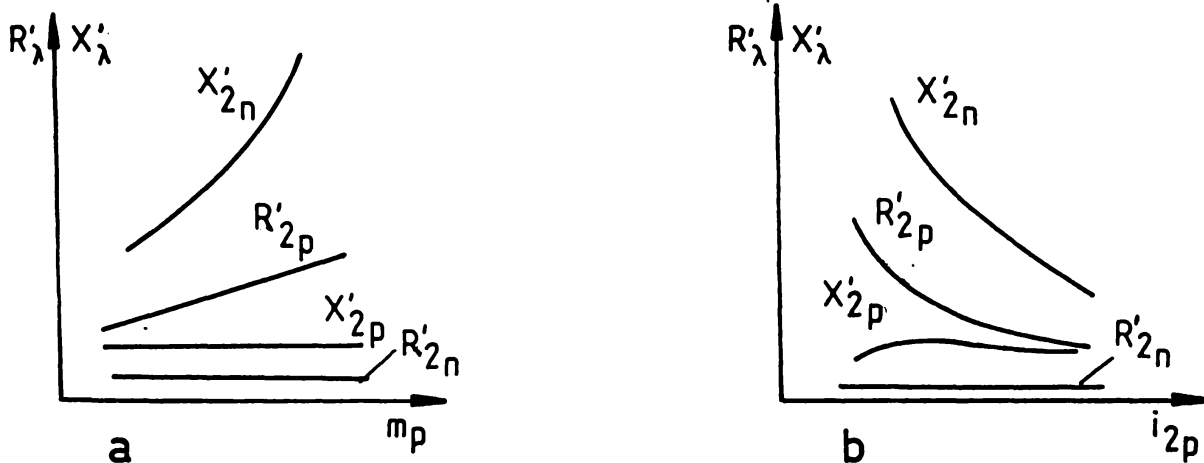


Figura 2.1. Reprezentarea grafică a curbelor R'_{2p} , R'_{2n} , X'_{2p} , X'_{2n} : a) în funcție de m_p , pentru un anumit curent i_{2p} dat; b) în funcție de i_{2p} pentru un anumit cuplu m_p .

Dependențele R'_{2p} , R'_{2n} , X'_{2p} și X'_{2n} în funcție de i_{2p} , la un m_p dat, rezultate pe baza relațiilor (2.42), sînt redată în Figura 2.1 b). Se observă că:

1) Rezistența R'_{2p} necesară crește rapid (aproape patritic) cu micșorarea curentului i_{2p} .

2) Reactanța X'_{2p} are o valoare relativ modestă, variind puțin la modificări ale valorii lui i_{2p} ; curba $X'_{2p} = f(i_{2p})$ trece printr-un maxim (după cum se poate deduce simplu din expresia sa (2.42)) pentru $i_{2p} = m_p \sqrt{2}$ - evident, dacă $m_p \sqrt{2}$ se încadrează în intervalul de variație normal al lui i_{2p} .

3) Reactanța X'_{2n} necesară este cu atît mai mare cu cît i_{2p} impus are o valoare mai redusă; creșterea lui X'_{2n} cu micșorarea lui i_{2p} este deosebit de rapidă.

Rezultatele de mai sus demonstrează că motorul în dublă colivie cu mărimi de pornire pretențioase trebuie realizat astfel ca factorul k_R și reactanța rotorică nominală să fie cu atât mai ridicate cu cât cuplul m_p impus este mai mare, respectiv cu cât, în special, i_{2p} impus are o valoare mai redusă.

Pentru o evaluare cantitativă aproximativă, în Tabelele T 2.1, T 2.2 și T 2.3 sînt redată curbele R'_{2p}/K , X'_{2p}/K și X'_{2n}/K , calculate în cazul unor cupluri m_p cuprinse între $m_p = 2,6$ și $m_p = 3$, respectiv al unor curenți $i_{2p} \approx 1,25 i_p$ cuprinși între $i_{2p} = 4$ și $i_{2p} = 5,5$.

Tabelul T 2.1. Variația lui $R'_{2p}/K = f(m_p, i_p)$, conform relației (2.42)

i_{2p}	4	4,25	4,5	4,75	5	5,25	5,5
m_p							
2,6	0,1625	0,1439	0,1283	0,1152	0,104	0,0943	0,0859
2,7	0,1637	0,1494	0,1333	0,1196	0,108	0,0979	0,0892
2,8	0,175	0,1550	0,1382	0,1241	0,112	0,1015	0,0925
2,9	0,1812	0,1605	0,1432	0,1285	0,116	0,1052	0,0958
3,0	0,1875	0,1660	0,1481	0,1329	0,120	0,1088	0,0991

Tabelul T 2.2. Variația lui $X'_{2p}/K = f(m_p, i_p)$, conform relației (2.42)

i_{2p}	4	4,25	4,5	4,75	5	5,25	5,5
m_p							
2,6	0,09499	0,09306	0,09068	0,08809	0,0854	0,08273	0,08010
2,7	0,09222	0,09085	0,08888	0,08660	0,0842	0,08167	0,0792
2,8	0,08926	0,08850	0,08698	0,08503	0,0828	0,08056	0,07824
2,9	0,08609	0,08600	0,08496	0,08336	0,0815	0,07938	0,07724
3,0	0,08267	0,08333	0,08281	0,08161	0,08	0,07815	0,07619

Tabelul T 2.3. Variația lui $X'_{2n}/K = f(m_p, i_p)$ conform relației (2.42)

i_{2p}	4	4,25	4,5	4,75	5	5,25	5,5
m_p							
2,6	0,37297	0,31570	0,27216	0,23882	0,21204	0,19027	0,17231
2,7	0,40098	0,33678	0,28838	0,25195	0,22274	0,19915	0,17978
2,8	0,43232	0,36001	0,30678	0,26615	0,23424	0,20865	0,18773
2,9	0,46766	0,38572	0,32635	0,28152	0,24664	0,21882	0,19622
3,0	0,50738	0,41436	0,34782	0,29823	0,26	0,22972	0,20527

În figurile 2.2 și 2.3 sînt reprezentate grafic curbele $R'_{2p} = f(m_p)$, $X'_{2n} = f(m_p)$ și $X'_{2p} = f(m_p)$, conform rezultatelor din tabelele de mai sus, pentru situațiile :

a) $i_{2p} = 4$ și b) $i_{2p} = 5$,

respectiv curbele $R'_{2p} = f(i_{2p})$, $X'_{2n} = f(i_{2p})$ și $X'_{2p} = f(i_{2p})$, pe baza aceluiași date, pentru :

a) $m_p = 3$ și $m_p = 2,6$.

Ele confirmă alura curbelor teoretice prezentate în Figura 2.1, precum și concluzia privind dificultățile de realizare a rotorului, cu atît mai mari cu cît mărimilor de pornire li se impun valori mai pretențioase. Într-adevăr, de exemplu, în cazul în care motorului i se cer : $m_p = 3$, $i_{2p} = 4$ ($i_p \approx 3,2$) rezultă că :

a) Rezistența R'_{2p} trebuie să fie de cca. 4 ori mai mare decît R'_{2n} (S-a considerat că $s_n = 0,045$).

b) Reactanța X'_{2n} trebuie să fie $X'_{2n} \approx 11,3 R'_{2n}$, respectiv $X'_{2n} \approx 2,7 R'_{2p}$.

c) Reactanța X'_{2p} trebuie să fie mult mai mică decît reactanța X'_{2n} și anume $X'_{2p} \approx 0,16 X'_{2n}$.

Este evident că realizarea rotorului în așa fel încît să se

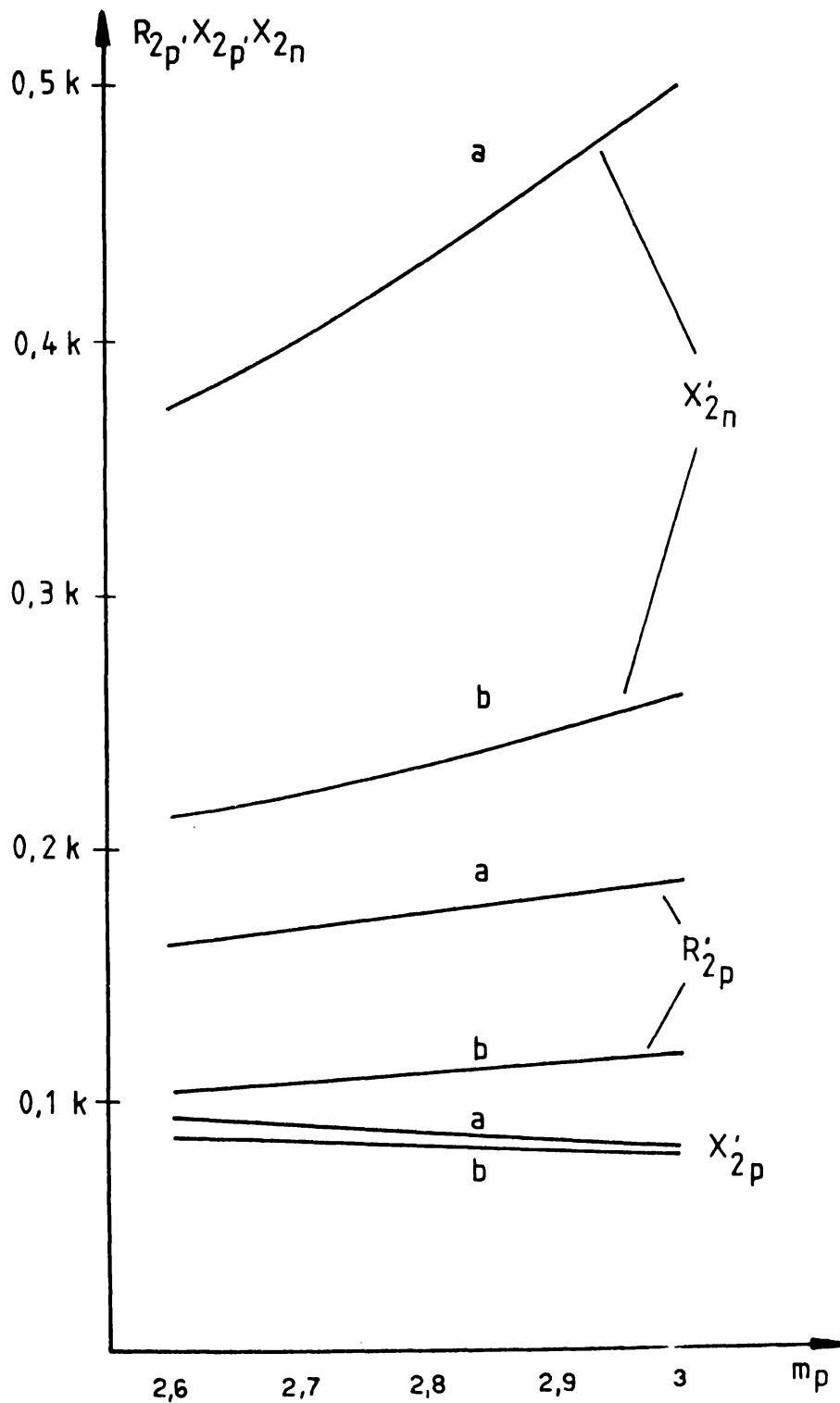


Figura 2.2. Variația parametrilor rotorici funcție de m_p

a) pentru $i_p = 4$; b) pentru $i_{2p} = 5$

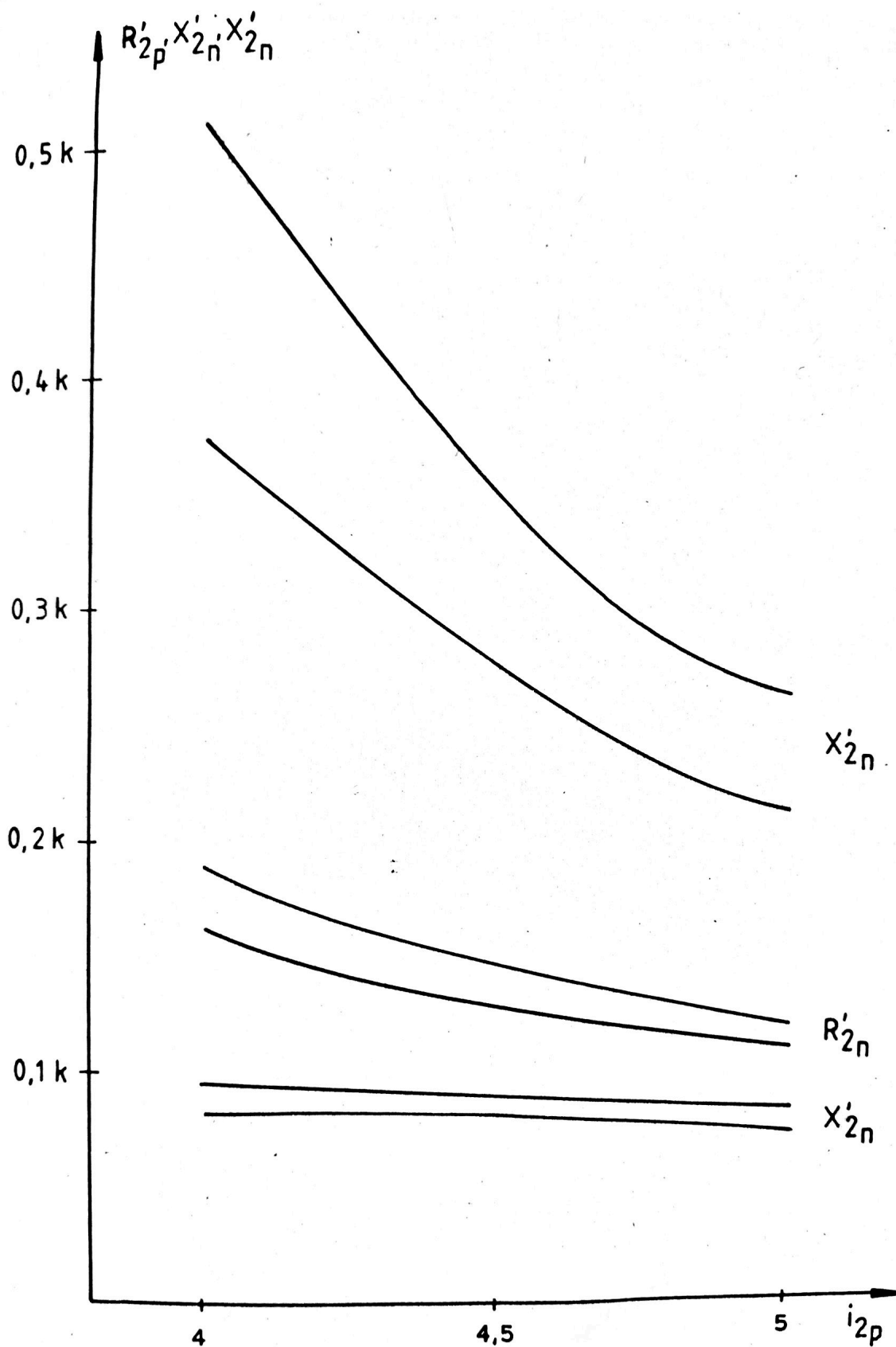


Figura 2.3. Variația parametrilor rotorici funcție de i_{2p} :

a) pentru $m_p = 3$; pentru $m_p = 2,6$

obțină la pornire o creștere atât de consistentă a rezistenței rotorice (circa 4 ori) și o micșorare atât de sensibilă (de peste 6 ori) a reactanței de dispersie întâmpină dificultăți deosebite, eventual chiar imposibilitatea executării lui astfel încât să se asigure mărimile de pornire prescrise.

Deși în considerentele făcute s-au admis o serie de ipoteze, se poate afirma că concluziile la care s-a ajuns sînt, calitativ, valabile pentru motoarele cu mărimi de pornire pretențioase care formează tematica studiului elaborat.

Concluzia principală care rezultă este aceea că, pentru a se putea dimensiona și executa fără dificultăți de netrecut, la fixarea temei de proiectare a unui motor asincron cu mărimi de pornire pretențioase, cuplul m_p trebuie impus la valoarea maximă efectiv necesară, pe cît posibil sub valoarea $m_p \cong 2,8$, iar curentul i_p la valoarea minimă necesară efectiv, pe cît posibil cît mai mare, $i_p \cong 3,5 - 4$ (în orice caz mai mare decît $i_p = 3,5$)

CAPITOLUL III.

PRINCIPALELE PARTICULARITATI ALE MOTOARELOR ASINCRONE IN DUBLA COLIVIE CU MARIMI DE PORNIRE PRETENTIOASE SI CONSECINTELE LOR ASUPRA CONCEPTIEI DE PROIECTARE.

3.1. Considerații introductive.

Metodicile de proiectare ale motoarelor în dublă colivie recomandate în literatură se referă la mașini cu mărimi de pornire superioare, dar nu deosebit de pretențioase. Ele se bazează pe ideea că cele două colivii lucrează în paralel, la pornire acționând teoretic numai colivia de pornire, iar în regim de lucru teoretic numai colivia de lucru.

Mărimile de pornire se asigură prin dimensionarea coliviei de pornire cu o rezistență relativ mult mai mare decât aceea a coliviei de lucru, respectiv prin dimensionarea coliviei de lucru cu o reactanță de dispersie clar superioară celei de pornire.

Metodicile de dimensionare propuse admit, în general, numeroase ipoteze simplificatoare și sînt similare atât pentru cazul a două colivii distincte cît și pentru cazul a două colivii cu inele comune. Ele se bazează pe proiectarea rotorului, de cele mai multe ori, pornind de la valorile impuse pentru randament și factor de putere, cuplul M_p și I_p rezultînd ca urmare a adaptării rotorului la cerințele respective.

În cele ce urmează, se analizează particularitățile principale care intervin la dimensionarea motoarelor asincrone în dublă colivie cînd se impun mărimi de pornire pretențioase. Aceste particularități rezultă în principal avînd în vedere :

- a) Necesitatea de a avea o rezistență rotorică R_2' mult sporită (pentru ca să rezulte cuplul de pornire M_p mare, prevăzut) ;
- b) Necesitatea de a avea o impedanță echivalentă la pornire Z_p suficient de mare (pentru a limita curentul de pornire I_p la valoarea scăzută impusă).

În limita posibilităților, este normal ca să se urmărească totodată menținerea masei de materiale active la nivelul motoarelor de serie, cu bare înalte (deci a indicatorului kW/kg), precum și a unor solicitări magnetice și electrice normale ale mașinii

(în vederea obținerii unui randament și a unui factor de putere cât mai apropiați de cei ai motoarelor de uz general corespondente)

Pentru a putea trage primele concluzii, calitative, asupra particularităților de dimensionare a motoarelor asincrone cu mărimi de pornire pretențioase analizăm pentru început expresia cunoscută a rezistenței rotorice la pornire (raportată la stator) :

$$R_{2p}' = k_{Rp} \rho \frac{L_b}{q_{b2}} k \quad (3.1)$$

unde k_{Rp} este factorul de creștere a rezistenței respective la pornire datorită efectului pelicular, q_{b2} secțiunea de calcul echivalentă a celor două colivii, iar k factorul de reducere (de raportare) a parametrilor rotorici la stator.

În cele ce urmează, mărimile care se referă la motorul de serie corespondent, ca putere, tensiune, turație, motorului cu mărimi de pornire pretențioase se vor nota cu asterisc.

Obținerea unui cuplu de pornire :

$$M_p = \frac{3R_{2p}' I_{2p}'^2}{\Omega_1} \quad (3.2)$$

Mult mai mare decât cuplul M_p al motorului de serie corespondent (de exemplu, $M_p = 2,8 M_n$ față de $M_p^* = 1,6 M_n^*$), când se impune un $I_{2p}' \ll I_{2p}^*$, este evident condiționată de realizarea unei rezistențe R_{2p}' mult sporită față de R_{2p}^* .

Rezistivitatea, care este o caracteristică a materialelor active folosite în construcția de mașini electrice, nu poate fi luată în considerație pentru o creștere substanțială - așa cum este necesar pentru rezistența R_{2p}' .

Factorul de raportare k la rîndul său, nu poate fi mărit sensibil, pentru că aceasta ar echivala cu prevederea unui număr de spire în stator, N_1 , mult mărit, adică un consum de cupru statoric mult sporit și în același timp o foarte slabă solicitare magnetică a mașinii.

Rezistența R_{2p}' nu poate fi mărită la valorile necesare nici

pe seama micșorării secțiunii q_{b_2} , pentru că densitatea de curent din rotor j_2 , poate fi mărită cel mult pînă la valoarea admisibilă $j_2 \text{ adm}$, în apropiere de care sînt dimensionate și motoarele de serie.

Cu aceste considerații, conform relației (3.1), rămîne ca soluție practică :

a) proiectarea rotorului în dublă colivie în așa fel încît factorul de mărire a rezistenței rotorice la pornire, k_{R_p} , să fie de valoare cît mai mare posibilă ;

b) creșterea, în măsura necesară, a lungimii L a rotorului și prin aceasta a întregii mașini.

Lungirea mașinii se impune cu toată siguranța, întrucît la mărimi de pornire mult mai pretențioase decît cele uzuale, chiar și la o dimensionare forțată a celor două colivii, factorul k_{R_p} nu poate fi mărit atît de mult încît să rezulte valoarea mult sporită R'_{2p} .

Fără îndoială că și limitarea la valori puternic scăzute a curentului de pornire I_p , deci și a curentului :

$$I'_{2p} = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + C_{1s}R'_{2p})^2 + (X_1 + C_{1s}X'_{2p})^2}} \quad (3.3)$$

are implicații asupra modului de dimensionare a motorului cu mărimi de pornire pretențioase. Dacă motorul se dimensionează, în concordanță cu cele spuse anterior, cu o rezistență R'_{2p} mare, impedanța Z_p (numitorul din relația (3.3)), crește, inclusiv prin mărirea (cu lungimea mașinii) și a reactanțelor X_1 și X'_{2p} .

Deci și sub aspectul reducerii curentului de pornire, creșterea lungimii mașinii este indicată. Dacă însă valoarea scăzută impusă curentului I_p este foarte pretențioasă, numai această mărire a lungimii mașinii nu este suficientă, fiind necesară dimensionarea rotorului astfel ca și reactanța rotorică la pornire, X'_{2p} , să fie superioară reactanței X_2^* a motorului de serie corespunzător.

Aceasta, avînd în vedere relația determinată, la un motor în dublă colivie, între reactanțele X'_{2n} și X'_{2p} , echivalează cu a

spune că motoarele cu mărimi de pornire pretențioase trebuie dimensionate, în general, cu o reactanță X'_{2n} mult mărită.

Prin urmare, un motor asincron cu mărimi de pornire pretențioase trebuie proiectat :

a) cu o lungime mai mare decât motorul de serie corespondent;
b) cu o configurație a creșturilor celor două colivii astfel aleasă încît :

- să asigure un factor de mărire a rezistenței rotorice la pornire k_{Rp} de valoare superioară celor obișnuite ;

- să conducă la o reactanță de dispersie rotorică X'_{2n} mai mare decât la motoarele de serie.

Analiza care urmează are drept scop de a determina cum trebuie procedat în practică, și în ce măsură, pentru satisfacerea acestor cerințe, în așa fel încît să rezulte mărimile de pornire pretențioase impuse prin enunț. Cu alte cuvinte, se urmărește stabilirea în concret, cantitativ, a particularităților de proiectare a motoarelor cu mărimi de pornire pretențioase care derivă din cerințele calitative deduse și prezentate mai sus, în funcție de mărimile de pornire m_p și i_p necesare a fi realizate.

În context cu tema tezei, se va insista în principal asupra particularităților respective în cazul motoarelor în dublă colivie turnate în aluminiu, mai robuste, mai simple constructiv și mai ieftine.

3.2. Modul de stabilire a dimensiunilor principale (D, L) ale motoarelor în dublă colivie cu mărimi de pornire pretențioase.

În cele ce urmează mi-am propus ca pe baza unei analize a modificărilor ce intervin privind diferitele mărimi funcționale, în condițiile menținerii constante a volumului mașinii, să determin o modalitate practică, concretă, de stabilire a dimensiunilor principale ale motorului cu mărimi de pornire pretențioase.

Prin convenție, se notează în continuare toate mărimile motorului de serie corespondent motorului cu mărimi de pornire pretențioase cu asterisc.

La un motor asincron trifazat, cuplul se poate exprima sub forma cunoscută :

$$M = \frac{m_1 R_2' I_2'^2}{\Omega_1 s} \quad (3.4)$$

Dacă în (3.4) considerăm $s = s_n$ și $I_2' = I_{2n}'$, cuplul care rezultă este cuplul nominal ; dacă în aceeași relație înlocuim astfel $s = 1$, $I_2' = I_{2p}'$, $R_2' = R_{2p}'$, obținem valoarea cuplului de pornire.

Considerînd deci că :

$$M_p = \frac{m_1 R_{2p}' I_{2p}'^2}{\Omega_1} ; \quad M_n = \frac{m_1 R_{2n}' I_{2n}'^2}{\Omega_1 s_n} \quad (3.5)$$

raportul dintre rezistența la pornire R_{2p}' și rezistența în sarcină nominală rezultă din relația :

$$m_p = \frac{M_p}{M_n} = \frac{R_{2p}'}{R_{2n}'} \cdot \frac{I_{2p}'^2}{I_{2n}'^2} s_n \quad (3.6)$$

ca fiind :

$$\frac{R_{2p}'}{R_{2n}'} = \frac{m_p}{i_{2p}^2} \cdot \frac{1}{s_n} \quad (3.7)$$

unde am notat $I_{2p}'/I_{2n}' = i_{2p}$ și $M_p/M_n = m_p$.

La neglijarea rezistenței inelelor de scurtcircuitare, totdeauna mult mai mică decît rezistența barelor, raportul dat de (3.7) se reduce la raportul rezistențelor de bară la pornire, respectiv în sarcină nominală, adică chiar factorul de creștere a rezistenței la pornire, datorită fenomenului de refulare a curentului, adică :

$$\frac{R_{2p}'}{R_{2n}'} \approx k_{Rp} \approx \frac{m_p}{i_p^2} \cdot \frac{1}{s_n} \quad (3.8)$$

La motorul de serie corespondent, acest factor va avea valoarea :

$$k_{R_p}^* = \frac{m_p^*}{i_{2_n}^*} \cdot \frac{1}{s_n^*} \quad (3.9)$$

unde $m_p < m_p^*$, $i_p > i_p^*$, iar $k_{R_p}^*$, s_n^* sînt cele care caracterizează acest motor de serie.

La cele două motoare considerate, cel cu mărimi de pornire pretențioase și cel de serie corespondent, factorii de refulare rotorici la pornire vor fi deci în raportul :

$$\frac{k_{R_p}}{k_{R_p}^*} = \frac{m_p}{m_p^*} \cdot \left(\frac{i_{2_p}^*}{i_{2_p}} \right)^2 \frac{s_n^*}{s_n} \quad (3.10)$$

Rezultă de aici raportul dintre alunecările nominale ale celor două motoare :

$$\frac{s_n}{s_n^*} = \frac{m_p}{m_p^*} \cdot \left(\frac{i_{2_p}^*}{i_{2_p}} \right)^2 \frac{k_{R_p}^*}{k_{R_p}} \quad (3.11)$$

dependent, după cum se vede, de mărimile de pornire și de factorii de refulare rotorici la pornire ai celor două motoare.

Pentru a stabili dacă acest raport este supraunitar (alunecarea $s_n > s_n^*$), subunitar ($s_n < s_n^*$) sau egal cu 1 ($s_n = s_n^*$), vom analiza valorile rapoartelor care intervin în membrul doi al relației (3.11) ; cum s-a menționat în §3.1, motoarele cu mărimi de pornire pretențioase trebuie dimensionate astfel ca să prezinte un factor de refulare rotoric la pornire mare, superior celui al motoarelor de serie corespondente. Deci, în (3.11) :

$$k_{R_p} > k_{R_p}^*, \text{ adică } k_{R_p}^*/k_{R_p} < 1$$

În schimb, datorită pretențiilor impuse motorului cu mărimi de pornire pretențioase, $m_p \gg m_p^*$, $i_{2_p} \ll i_{2_p}^*$ (admitem, cu aproximație, că $i_{2_p} \cong 1,25 i_p$) ; ca urmare :

$$\frac{m_p}{m_p^*} \left(\frac{i_{2_p}^*}{i_{2_p}} \right)^2 \gg \frac{k_{R_p}}{k_{R_p}^*}$$

De exemplu, un motor de serie de $P_n = 15 \text{ kW}$ și $n_1 = 750 \text{ rpm}$ prezintă, conform normelor, un cuplu de pornire relativ $m_p^* = 1,6$ și un curent de pornire relativ $i_p^* = 5,5$.

Dacă motorului corespundent cu mărimi de pornire pretențioase i se impun $m_p = 2,8$ și $i_p = 4$, produsul din relația (3.11)

$$\frac{m_p}{m_p^*} \left(\frac{i_p}{i_p^*} \right)^2 \approx \frac{m_p}{m_p^*} \left(\frac{i_p^*}{i_p} \right)^2 = \frac{2,8}{1,6} \left(\frac{5,5}{4} \right)^2 = 3,3086$$

Dacă apreciem $k_{R_p}^*/k_{R_p} = 1/2$, rezultă că

$$\frac{s_n}{s_n^*} = \frac{3,3086}{2} = 1,6543$$

Considerînd și alte cazuri, se ajunge la concluzia că practic întotdeauna motorul în dublă colivie cu mărimi de pornire pretențioase trebuie dimensionat cu o alunecare $s_n > s_n^*$ (deci sporită). Măsura în care trebuie mărită alunecarea s_n depinde de valorile relative $m_p \div m_p^*$; $i_p \div i_p^*$; $k_{R_p} \div k_{R_p}^*$.

Prima particularitate a proiectării motoarelor asincrone cu mărimi de pornire pretențioase este deci aceea că ele urmează a fi dimensionate cu alunecări s_n mai mari decît motoarele de serie corespundente.

La o anumită putere nominală, deci la un același curent (practic) $I_{2n}' \approx I_{2n}^*$, conform relației curentului :

$$I_{2n}' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + C_1 \frac{R_2'}{s_n} \right)^2 + \left(X_1 + C_1 X_2' \right)^2}} \quad (3.12)$$

pentru ca $I_{2n}' = I_{2n}^*$, trebuie satisfăcută egalitatea :

$$\frac{R_2'}{s_n} = \frac{R_2'^*}{s_n^*} \quad (3.13)$$

(presupunând că $R_1 = R_1^*$, $X_1 = X_1^*$, $X_{2n}' = X_{2n}^*$), adică motorul cu mărimi de pornire pretențioase trebuie să prezinte o rezistență :

$$R_{2n}' = \frac{s_n}{s_n^*} R_{2n}^*, > R_{2n}^* \quad (3.14)$$

și anume în raportul în care stau alunecările s_n și s_n^* .

A doua particularitate a proiectării motoarelor asincrone cu mărimi de pornire pretențioase constă, prin urmare, în dimensionarea lor cu o rezistență rotorică R_{2n}' mai mare (în raportul s_n/s_n^*)

decît aceea a motorului de serie corespondent. Cum s-a dedus în §3.1 această creștere a lui R_{2n}' urmează a se realiza, în mare măsură, prin mărirea lungimii mașinii. Fie raportul de creștere respectiv față de motorul de serie corespondent :

$$L/L^* = \gamma \quad (3.15)$$

Dacă impunem ca motorul cu mărimi de pornire pretențioase să se caracterizeze, ca și motorul de serie corespunzător, prin același indice kW/kg (adică același volum), rezultă că trebuie satisfăcută relația :

$$\frac{\pi D^2}{4} L = \frac{\pi D^{*2}}{4} L^*$$

de unde rezultă, în condițiile menționate, că

$$\frac{D}{D^*} = \sqrt{\frac{L^*}{L}} = \sqrt{\frac{1}{\gamma}} \quad (3.16)$$

ceea ce este echivalent cu a spune că :

$$\frac{\tau}{\tau^*} = \sqrt{\frac{1}{\gamma}} \quad (3.17)$$

În aceste condiții, factorul $\lambda = L/\tau$ din cazul motorului cu mărimi de pornire pretențioase trebuie să se găsească față de λ^* în raportul :

$$\frac{\lambda}{\lambda^*} = \frac{L}{L^*} \cdot \frac{\tau^*}{\tau} = \gamma \sqrt{\gamma} = \gamma^{1,5} \quad (3.18)$$

Relațiile (3.16) și (3.18) scot în evidență și următoarele particularități de dimensionare a motoarelor asincrone cu mărimi de pornire pretențioase :

a) aceste motoare se caracterizează printr-un diametru $D < D^*$ al motorului de serie corespunzător ;

b) ele se caracterizează, în același timp, și prin aceea că $\lambda > \lambda^*$, practic destul de sensibil.

Pentru a putea trage concluzii privind măsura în care trebuie mărită valoarea lui λ^* se analizează pe mai departe consecințele care rezultă privind principalele mărimi funcționale. La o aceeași solicitare magnetică a celor două mașini (deci același B_δ , același factor de saturație dentară k_{s_d})

$$\frac{\phi}{\phi^*} = \frac{\alpha_i L \tau B_\delta}{\alpha_i L^* \tau^* B_\delta} = \frac{\tau}{\tau^*} \cdot \frac{L}{L^*} = \sqrt{\frac{1}{\gamma}} \gamma = \sqrt{\gamma} > 1 \quad (3.19)$$

Fluxul din motorul cu mărimi de pornire pretențioase fiind mai mare, în aceleași condiții de solicitare magnetică, decât cel al motorului de serie corespondent, dacă realizăm cele două mașini cu același număr de creștături $Z_1 = Z_1^*$ în stator și aceeași deschidere relativă a bobinelor $y/\tau = y^*/\tau^*$ (deci aceeași scurta-re), din relația tensiunii electromotoare induse, admisă practic aceeași și pentru un motor și pentru celălalt, rezultă egalitatea :

$$U_{e_1} \approx \sqrt{2} \pi f_1 k_{b_1} N_1 \phi = \sqrt{2} \pi f_1 k_{b_1} N_1^* \phi^*$$

($k_{b_1}^* = k_{b_1}$ în situația respectivă) și deci :

$$\frac{N_1}{N_1^*} = \frac{\phi}{\phi^*} = \sqrt{\frac{1}{\gamma}} \quad (3.20)$$

Numărul de spire N_1 ale motorului cu mărimi de pornire pretențioase trebuie deci adoptat mai mic decât cel al motorului de serie corespondent, în raportul respectiv.

Acest rezultat este, desigur, favorabil, prin faptul că conduce la o limitare a creșterii rezistenței R_1 în urma lungirii mașinii la o valoare apropiată de R_1^* și deci și a pierderilor din în-

fășurarea statorică.

În acest stadiu, putem stabili și în ce raport stau încărcările liniare ale celor două mașini. Pornind de la expresia încărcării liniare

$$A = \frac{2 m_1 N_1 I_{1n}}{\pi D}$$

rezultă, dacă admitem că $I_{1n} \approx I_{1n}^*$,

$$\frac{A}{A^*} \approx \frac{N_1}{N_1^*} \cdot \frac{D^*}{D} = \sqrt{\frac{1}{\gamma}} \sqrt{\gamma} = 1 \quad (3.21)$$

După cum se observă, încărcarea liniară a motorului cu mărimi de pornire pretențioase se menține practic același ca și la motorul de serie în condițiile arătate, ceea ce prezintă o importanță deosebită, în sensul că la o dimensionare a motorului cu mărimi de pornire pretențioase în condițiile descrise, încălzirea lui se va menține practic la nivelul celei a motorului de serie. Se face, totuși, precizarea că, în realitate, probabil că I_{1n} va fi ceva mai mare decât I_{1n}^* , având în vedere consumul puterii reactive mai mare (datorită reactanței X_{2n}' sporite).

Până aici am arătat și am analizat particularitățile principale privind dimensionarea motoarelor asincrone în dublă colivie și cu mărimi de pornire pretențioase și am făcut comparație cu motoarele asincrone de serie.

Acum doresc să determin modul concret de stabilire a dimensiunilor principale ale lui D și L ale motoarelor cu mărimi de pornire pretențioase, prin urmare ne trebuie concluzii cantitative și nu numai calitative, fără să fim obligați să facem comparație cu cele ale motoarelor de serie, care poate nu sînt cunoscute la proiectarea motoarelor cu mărimi de pornire pretențioase.

Deci am să determin modul în care este recomandabil să se adopte la motoarele cu mărimi de pornire pretențioase factorul λ , de care depind și D și L (relațiile lor de calcul adoptîndu-le pe cele propuse în literatură⁵):

$$D = \sqrt[3]{\frac{2p}{\pi \lambda} \cdot \frac{60 S_i}{n_1 C}}$$

respectiv

$$L = \tau \lambda = \frac{\pi D}{2p} \lambda$$

Intrucît prin relația (3.18) s-a arătat că $\lambda/\lambda^* = \gamma^{1,5}$, încercăm să stabilim cam ce valori trebuie să aibă γ .

Relația (3.15) ne-a arătat că $L/L^* = \gamma$. Dar, conform relației (3.13), raportul dintre rezistențele rotorice R'_{2n} și R_{2n}^* este :

$$\frac{R'_{2n}}{R_{2n}^*} = \frac{s_n}{s_n^*} \quad (3.22)$$

raport care se poate pune și sub forma :

$$\frac{k R_{2n}}{k^* R_{2n}^*} = \frac{s_n}{s_n^*} \quad (3.23)$$

Raportul k/k^* poate fi exprimat în funcție de parametrul γ definit prin relația (3.15). Intr-adevăr :

$$k = \frac{4 m_1 (k_{b1} N_1)^2}{k_{b2}^2 Z_2^2} ; \quad k^* = \frac{4 m_1 (k_{b1}^* N_1^*)^2}{k_{b2}^{*2} Z_2^{*2}}$$

în care cu k_{b2} (k_{b2}^*) s-a notat factorul de înclinare a barelor rotorice, iar cu Z_2 (Z_2^*) numărul de creștături rotorice.

Făcînd raportul între acești doi factori de reducere ai parametrilor rotorici la stator, obținem :

$$\frac{k}{k^*} = \frac{N_1^2}{N_1^{*2}} \cdot \frac{k_{b2}^{*2} Z_2^{*2}}{k_{b2}^2 Z_2^2} = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{Z_2^*}{Z_2} \left(\frac{k_{b2}^*}{k_{b2}} \right)^2 \quad (3.24)$$

În mod similar, pentru factorul de reducere al curentului rotorice, care este de forma :

$$k_i = \frac{2 m_1 k_{b1} N_1}{k_{b2} Z_2}$$

raportul k_i/k_i^* rezultă :

$$\frac{k_i}{k_i^*} = \frac{N_1}{N_1^*} \cdot \frac{k_{b_2}^* Z_2^*}{k_{b_2} Z_2} = \sqrt{\frac{1}{\gamma}} \frac{Z_2^*}{Z_2} \cdot \frac{k_{b_2}^*}{k_{b_2}} \quad (3.25)$$

Introducînd în relația (3.23) pe k/k^* obținut rezultă :

$$\frac{s_n}{s_n^*} = \left(\frac{1}{\gamma} \cdot \frac{k_{b_2}^{*2} Z_2^*}{k_{b_2}^2 Z_2} \right) \frac{R_{2n}}{R_2^*} \quad (3.26)$$

La motoare în dublă colivie, neglijînd rezistența inelelor R_{c_2}

$$R_{2n} \approx \frac{R_{b_i}}{1 + \alpha} = \frac{\rho}{1 + \alpha} \cdot \frac{L_b}{q_{b_i}} \quad (3.27)$$

unde

$$q_{b_i} = \frac{I_{2b_i}}{j_2} = \frac{I_2}{(1 + \alpha) j_2} = \frac{k_i I_2'}{(1 + \alpha) j_2}$$

În relația de mai sus R_{b_i} este rezistența barei coliviei de lucru (i) iar $\alpha = R_{b_i}/R_{b_e}$ este raportul rezistenței barei coliviei interioare de lucru (i) către rezistența barei coliviei exterioare de pornire (e).

Comparăm cu motoarele cu bare înalte. La motoarele de serie cu bare înalte rezistența rotorică este :

$$R_{2n}^* = \rho \frac{L_b^*}{q^*} \quad (3.28)$$

unde

$$q^* = \frac{I_2^*}{j} = \frac{k_i^* I_2^*}{j_2}$$

Cu aceasta, se determină $R_{2n}/R_{2n}^* = f(\gamma)$:

$$\frac{R_{2n}}{R_{2n}^*} = \left(\frac{\rho L}{(1 + \alpha)} \cdot \frac{(1 + \alpha) j_2}{k_i I_2'} \right) \frac{k_i^* I_2'^*}{\rho L^* j_2^*} = \frac{L}{L^*} \frac{k_i^*}{k_i} \frac{j_2}{j_2^*} \frac{I_2'^*}{I_2'}$$

În cazul motoarelor corespondente, de aceeași putere nominală P_n și deci $I_{2n}^* \cong I_{2n}'$, relația obținută mai sus se poate scrie, avînd în vedere relațiile (3.15), (3.25) și valoarea lui k_i/k_i^* , ca

$$\frac{R_{2n}}{R_{2n}^*} = \gamma \left(\sqrt{\gamma} \cdot \frac{Z_2}{Z_2^*} \cdot \frac{k_{b2}}{k_{b2}^*} \right) \frac{j_2}{j_2^*} \quad (3.29)$$

Introducînd în (3.23) pe R_{2n}/R_{2n}^* sub forma (3.29) și pe k/k^* sub forma (3.24) rezultă :

$$\left(\frac{1}{\gamma} \cdot \frac{Z_2^*}{Z_2} \cdot \frac{k_{b2}^{*2}}{k_{b2}^2} \right) \left(\gamma \sqrt{\gamma} \cdot \frac{Z_2}{Z_2^*} \cdot \frac{k_{b2}}{k_{b2}^*} \cdot \frac{j_2}{j_2^*} \right) = \frac{s_n}{s_n^*}$$

Făcînd simplificările posibile se obține că :

$$\gamma = \frac{L}{L^*} = \left(\frac{s_n}{s_n^*} \cdot \frac{k_{b2}}{k_{b2}^*} \cdot \frac{j_2^*}{j_2} \right)^2 \quad (3.30)$$

Ajungînd la relația (3.30) se observă, deocamdată, că γ nu este influențat de numărul creștăturilor din rotor.

Pentru a limita pe γ este favorabil ca :

- a) să se dimensioneze cu j_2 cît mai mare ;
- b) barele coliviilor să se execute nefînclinate, situație pentru care avem pe $k_{b2} = 1$ (valoarea maximă posibilă).

Cum și mașinile de serie se calculează cu j_2 spre limita maximă admisibilă, respectiv la înclinarea barelor cu $\sim t_1$, factor $k_{b2} \cong 0,98$, rezultă că pe aceste căi nu se pot obține limitări sensibile ale lui γ . De altfel, realizarea rotorului motorului asincron cu mărimi de pornire pretențioase cu bare nefînclinate este o problemă discutabilă, avînd în vedere pericolul rezultat prin neatenuearea unor cupluri parazite.

În această situație, influența predominantă asupra valorii lui γ revine raportului s_n/s_n^* .

Considerînd că pentru realizarea mașinii la dimensiuni rezonabile, creșterea lungimii admisibile este de maxim cca.20%, cînd $\gamma \leq 1,2$, rezultă concluzia că este normal ca

$$\frac{s_n}{s_n^*} \leq \sqrt{1,2} \approx 1,1$$

S-a dedus însă (a se vedea relația (3.11)) că

$$\frac{s_n}{s_n^*} = \frac{m_p}{m_p^*} \left(\frac{i_{2p}^*}{i_{2p}} \right)^2 \frac{k_{Rp}^*}{k_{Rp}}$$

relație care arată că raportul s_n/s_n^* este cu atît mai mare cu cît m_p/m_p^* și mai ales $(i_{2p}^*)/i_{2p}$ sînt mai mari.

Pentru a putea realiza mașina cu $\gamma \leq 1,2$ rezultă, pe baza celor de mai sus, o concluzie practică deosebit de importantă. Ea se poate enunța prin a spune că, pentru a putea executa un motor asincron cu mărimi de pornire pretențioase în condiții bune, valorile lui m_p și i_p care se impun urmează să fie cele efectiv necesare; orice exagerare în această privință, de exemplu pentru a avea "un coeficient de siguranță" atrage după sine apariția de reale dificultăți în realizarea rațională a motorului.

Dau un exemplu numeric care evidențiază această necesitate în mod foarte clar:

a) Pentru datele $m_p = 2,8$ și $i_p = 4$, față de $m_p^* = 1,8$ și $i_p^* = 7$, dacă admitem că $k_{Rp} \approx 2,3 k_{Rp}^*$, rezultă conform relației (3.11) că este necesar următorul raport între alunecările nominale:

$$\frac{s_n}{s_n^*} = \frac{2,8}{1,8} \left(\frac{7}{4} \right)^2 \frac{1}{2,3} = 2,07$$

și deci dacă $j_2 = j_2^*$, $k_{b2} = k_{b2}^*$, raportul de lungimi - a se vedea relația (3.30) - este:

$$\frac{L}{L^*} = 2,07^2 = 4,29$$

evident de neadmis, pentru că L este exagerat de mare.

b) La aceleași date, cu diferența că $i_p = 5,5$, rezultă :

$$\frac{s_n}{s_n^*} = \frac{2,8}{1,8} \left(\frac{7}{5,5}\right)^2 \cdot \frac{1}{2,3} = 1,0955 \text{ și}$$

$$\frac{L}{L^*} = 1,0955^2 = 1,2$$

adică alungirea necesară a motorului cu mărimi de pornire pretențioase (față de motorul de serie corespondent) se înscrie în limite rezonabile.

Admițînd că mărimile m_p și i_p sînt impuse la valorile lor efectiv necesare, determinarea dimensiunilor principale ale motoarelor asincrone cu mărimi de pornire pretențioase se propune a se face în felul următor :

1) se aproximează valoarea raportului $k_{R_p}/k_{R_p}^*$ realizabilă în cadrul construcției rotorice în dublă colivie ca fiind $k_{R_p}/k_{R_p}^* \approx 1,8 - 2,3$;

2) pe baza mărimilor impuse m_p și i_p și a datelor de catalog m_p^* și i_p^* ale motorului de serie corespondent, se determină cu (3.11) valoarea necesară a raportului s_n/s_n^* ;

3) cunoscînd valoarea acestui raport, se stabilește cu (3.10) valoarea necesară a raportului $\gamma = L/L^*$; pentru simplificare, se poate considera că $j_2^* \approx j_2$, $k_{b_2}^* = k_{b_2}$;

4) se determină, cu (3.18), valoarea necesară a parametrului λ , valoarea lui λ^* adoptîndu-se pe baza recomandărilor din literatură.

Adoptînd, de asemenea, și constanta mașinii C_i , practic egală cu aceea a motorului de serie corespondent, se stabilesc dimensiunile motorului cu mărimi de pornire pretențioase :

$$D = \sqrt{\frac{2\pi}{p\lambda} \cdot \frac{S_i}{n_1 C_i}} \quad (3.31)$$

$$L = \lambda \tau \quad (3.32)$$

în care λ are valoarea stabilită în modul arătat.

Dacă în urma acestui calcul rezultă un $\gamma > 1,2 - 1,22$ se propune a se analiza posibilitatea de a se micșora cuplul m_p impus sau (și) de a mări curenții i_p impus. În situația în care acest (aceste) deziderat poate fi satisfăcut și γ poate fi adus la valori $\gamma \leq 1,2$, calculul lui D și L se face pe baza parametrului λ rezultat în condițiile respective. Dacă modificarea mărimilor de pornire nu este posibilă, ele avînd valorile limită necesare acționării considerate, urmează ca pentru γ să se considere valoarea $\gamma = 1,2 - 1,22$, urmînd ca la diametrul D și lungimea L care rezultă - relațiile (3.31), (3.32) - dimensionarea rotorului să fie forțată astfel ca raportul $k_{R_p} / k_{R_p}^*$ să se mărească la valoarea corespunzătoare.

3.3. Problema randamentului și a factorului de putere nominal. Influența lor asupra dimensiunilor D , L .

Prin intermediul puterii interioare, care este :

$$S_i = k_e S_n = \frac{k_e P_n}{\eta_n \cos \psi_n} \quad (3.33)$$

dimensiunile principale D și L ale motorului asincron cu mărimi de pornire pretențioase depind și de randamentul și factorul de putere nominal al mașinii.

Prezintă deci interes stabilirea - în comparație cu a motoarelor de serie corespondente - a valorilor probabile ale acestor mărimi funcționale ale unui motor cu mărimi de pornire pretențioase.

De la început se impune observația că motoarele cu mărimi de pornire pretențioase prezintă pierderi P_{b_2} în bobinajul rotoric mai mari decît motoarele de serie corespondente, pentru că rezistența R_2' este mai mare decît rezistența R_2^* , la I_{2n}' aproximativ egal cu I_{2n}^* .

În continuare, este necesar, pentru a putea judeca ce se întîmplă cu randamentul η_n față de randamentul η_n^* , să analizăm ce se întîmplă cu pierderile din bobinajul statoric ($P_{b_{1n}}$) și cele din miezul statoric (P_{Fe_1}).

În acest scop, mai departe, trebuie să luăm în considerare rezistențele R_1 și R_1^* , respectiv să analizăm cum (în ce raport) stau aceste rezistențe R_1 și R_1^* .

Este cunoscută relația :

$$R = \rho \frac{l_m N}{q_b}$$

unde $l_m = L_{sp}$ reprezintă lungimea spirei medii. Se admite că lungimea capetelor de bobină se poate exprima sub forma :

$$L_{c_b} = (1,5 - 1,6) \tau \quad (3.34)$$

(valoarea medie obișnuită la motoarele asincrone).

Prin urmare, lungimea spirei medii este, ca aproximație medie,

$$L_{sp} \approx 2(L + L_{c_b}) = 2\left(L + 1,55 \frac{L}{\lambda}\right) = \frac{2L(\lambda + 1,55)}{\lambda}$$

ceea ce înseamnă că :

$$\frac{L_{sp}}{L_{sp}^*} = \frac{L(\lambda + 1,55)}{\lambda} \cdot \frac{\lambda^*}{L^*(\lambda^* + 1,55)} = \frac{1}{\gamma^{0,5}} \cdot \frac{\gamma^{1,5} \lambda^{*+1,55}}{\lambda^* + 1,55} \quad (3.35)$$

Relația (3.35) arată că L_{sp}/L_{sp}^* este ceva mai mare decât 1, pentru că avînd în vedere că factorul $\gamma^{1,5}$ este relativ mult mai mare decât 1, raportul $(\gamma^{1,5} \lambda^{*+1,55})/(\lambda^* + 1,55)$ rezultă superior mărimei de la numitor $\gamma^{0,5}$ (supraunitar și acesta, dar de valoare mai mică decât raportul amintit). Pentru o apreciere cantitativă a acestui raport ne referim la același motor în dublă colivie cu mărimi de pornire pretențioase de 15 kW, 750 rpm, la care $\gamma = 1,2$ și $\lambda = 2,892$.

Corespunzător avem :

$$a) \lambda^* = \frac{\lambda}{\gamma^{1,5}} = \frac{2,892}{1,2^{1,5}} = 2,2$$

$$b) \frac{L_{sp}}{L_{sp}^*} \approx \frac{1}{\gamma^{0,5}} \cdot \frac{\gamma^{1,5} \lambda^{*+1,55}}{\lambda^* + 1,55} = \frac{1}{1,2^{0,5}} \cdot \frac{1,2^{1,5} \cdot 2,2 + 1,55}{2,2 + 1,55}$$

Rezultatul este $1,08 > 1$.

Raportul rezistențelor R_1 și R_1^* este :

$$\frac{R_1}{R_1^*} = \frac{L_{sp} N_1}{q_{b1}} \cdot \frac{q_{b1}^*}{L_{sp}^* N_1^*} = \frac{N_1}{N_1^*} \cdot \frac{L_{sp}}{L_{sp}^*} \cdot \frac{q_{b1}^*}{q_{b1}} \approx 2$$

$$\approx \sqrt{\frac{1}{\gamma}} \cdot \sqrt{\frac{1}{\gamma}} \cdot \frac{\lambda + 1,55}{\lambda^* + 1,55} \cdot \frac{q_{b1}^*}{q_{b1}}$$

adică :

$$\frac{R_1}{R_1^*} \approx \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{\lambda + 1,55}{\lambda^* + 1,55} \cdot \frac{q_{b1}^*}{q_{b1}} \quad (3.36)$$

Acest raport este însă de puțin mai mare decât 1 , pentru că la valori obișnuite ale lui λ^*

$$\frac{\lambda + 1,55}{\lambda^* + 1,55} \approx \frac{\gamma^{1,5} \lambda^* + 1,55}{\lambda^* + 1,55} \approx \gamma$$

astfel că produsul lor tinde la 1.

În cazul motorului considerat, de 15 kW, 750 rpm, folosind valorile λ , λ^* , γ date cu (3.36) rezultă că :

$$\frac{R_1}{R_1^*} \approx 0,986 \frac{q_{b1}^*}{q_{b1}} \rightarrow 1$$

În domeniul $\gamma = 1,1 - 1,2$ și $\lambda = 2,2 - 3$, raportul R_1/R_1^* diferă puțin de rezultatul obținut mai sus, astfel că se poate aprecia că, în general,

$$R_1/R_1^* \approx (0,98 - 0,99) q_{b1}^*/q_{b1} \quad (3.37)$$

Prin urmare, chiar și la $q_{b1}^*/q_{b1} = 1$, $R_1 < R_1^*$ cu ceva, cele două rezistențe avînd însă valori comparabile.

O micșorare suplimentară, limitată, a lui R_1 poate fi obținută și prin alegerea unui $j_1 < j_1^*$ (deci $q_{b1} > q_{b1}^*$) ; cum din motive economice j nu poate fi redus prea mult, deci pe această

cale raportul R/R^* poate fi influențat foarte puțin, concluzia finală este că se poate admite, în general, că rezistența statorică a motorului asincron cu mărimi de pornire pretențioase R_1 este $R_1 \approx R_1^*$, rezistența R_1 , de obicei, fiind mai mică cu 1 - 2 %.

În această situație și pierderile $P_{b_1} \approx P_{b_1}^*$ sau mai mici cu circa 1 - 2 % (avînd în vedere că deoarece $I_{1n} > I_{1n}^*$, $q_{b_1} > q_{b_1}^*$).

În continuare se analizează comparativ pierderile în fier ale motorului asincron cu mărimi de pornire pretențioase cu cele ale motorului de serie corespondent.

Pierderile în fier se calculează în practică pe baza masei de fier și a pierderilor specifice p_{Fe}^* (W/kg), care depind - la frecvența dată - de solicitarea magnetică a părții de miez considerată.

Pentru compararea pierderilor în fier ale motoarelor cu mărimi de pornire pretențioase cu cele ale motoarelor de serie corespondente admitem că :

a) motorul cu mărimi de pornire pretențioase este dimensionat conform cu considerentele expuse în §3.2;

b) el are un număr de creștături satorice $Z_1 = Z_1^*$, respectiv aceeași deschidere a bobinelor $y = y^*$ ca și motorul de serie corespondent (cele două mașini au același factor de bobinaj).

Considerînd că ambele mașini sînt astfel executate încît diametrul exterior al statorului este $D_e = k_D D$, unde k_D are valoarea recomandată în literatură pentru numărul p de perechi al mașinii, la neglijarea golurilor reprezentate de creștături, volumul de fier al celor două statoare, al motorului cu mărimi de pornire pretențioase și al motorului de serie corespondent, sînt :

$$V_{Fe} \approx \frac{\pi}{4} (D_e^2 - D^2) L = \frac{\pi}{4} D^2 L (k_D^2 - 1) ;$$

$$V_{Fe}^* \approx \frac{\pi}{4} (D_e^{*2} - D^{*2}) L^* = \frac{\pi}{4} D^{*2} L^* (k_D^2 - 1) ;$$

adică :

$$\frac{V_{Fe}}{V_{Fe}^*} = \left(\frac{D}{D^*} \right)^2 \frac{L}{L^*} = \left(\sqrt{\frac{1}{\gamma}} \right)^2 \gamma = 1 \quad (3.38)$$

Masele de fier ale celor două statoare sînt, prin urmare,

într-o primă aproximație, egale. Această concluzie este aproximativ valabilă și pentru masa dinților (dinții de același număr, de înălțime ceva mai mică și de lățime ceva mai mare la motorul cu mărimi de pornire pretențioase), cât și pentru masele celor două juguri.

La aceeași inducție magnetică în întrefier B_{δ} , lățimea dintelui la motorul cu mărimi de pornire pretențioase fiind ceva mai mare, inducția B_{d1} va rezulta de puțin mai mică decât B_{d1}^* . Se poate afirma deci că, cu multă probabilitate,

$$P_{Fe_{d1}} < P_{Fe_{d1}^*} \quad (3.39)$$

valorile acestor pierderi pentru cele două motoare care se compară fiind însă apropiate.

Raportul inducțiilor în cele două juguri este evident

$$\frac{B_{j1}}{B_{j1}^*} = \frac{\Phi}{h_{jL}} \cdot \frac{h_j^* L^*}{\Phi^*} = \sqrt{\frac{1}{\gamma}} \cdot \frac{D^* (k_D - 1) - 2 h_{c1}^*}{D(k_D - 1) - 2 h_{c1}} \quad (3.40)$$

în care $D^* = D\sqrt{\gamma}$ (a se vedea relația (3.16))

Raportul dintre masele jugurilor celor două motoare este :

$$\begin{aligned} \frac{M_{Fe_{j1}}}{M_{Fe_{j1}^*}} &= \frac{L \left[k_D^2 D^2 - (D + 2h_{c1})^2 \right]}{L^* \left[k_D^{*2} D^{*2} - (D^* + 2h_{c1}^*)^2 \right]} = \\ &= \gamma \frac{k_D^2 D^2 - (D + 2h_{c1})^2}{k_D^{*2} D^{*2} - (D^* + 2h_{c1}^*)^2} \end{aligned} \quad (3.41)$$

Admițînd că $h_{c1} \approx h_{c1}^*$

$$\frac{P_{Fe_{j1}}}{P_{Fe_{j1}^*}} = \frac{(k_D + 1)D + 2h_{c1}}{(k_D - 1)D - 2h_{c1}} \cdot \frac{(k_D - 1)D^* - 2h_{c1}}{(k_D + 1)D^* + 2h_{c1}} \quad (3.42)$$

Intrucît $2h_{c1}$ este, relativ, mai mare în raport cu $(k_D - 1)D$

relația (3.42) ne duce la o valoare supraunitară, care nu poate însă diferi cu mult de 1, la $\gamma \leq 1,2$.

Putem aprecia, astfel, că în general

$$p_{Fe_{j_1}} \approx (1,06 - 1,1)p_{Fe_{j_1}}^* \quad (3.43)$$

În ansamblul lor, pierderile principale totale în fierul motorului cu mărimi de pornire pretențioase sînt deci mai mari decît cele ale motorului de serie corespondent, și anume :

$$p_{Fe} \approx (1,03 - 1,05)p_{Fe}^* \quad (3.44)$$

Diferența în plus este deci neesențială.

În condițiile în care $p_{b_1} \approx p_{b_1}^*$, $p_{Fe} \approx p_{Fe}^*$ și $p_{b_2} > p_{b_2}^*$ motoarele cu mărimi de pornire pretențioase prezintă în mod inevitabil un randament nominal $\eta_n < \eta_n^*$.

Pentru că p_{b_2} reprezintă numai o parte din pierderile totale, deși ele pot fi mai mari decît $p_{b_2}^*$ pînă la + 10% (la $\gamma = 1,2$), randamentul se micșorează într-o măsură mai mică decît cresc p_{b_2} .

La o evaluare cantitativă aproximativă, se poate considera că, în general,

$$\eta_n \approx \eta_n^* - (0,01 - 0,025) \quad (3.45)$$

Al doilea aspect care ne interesează din punct de vedere energetic este acela al factorului de putere cu care poate lucra motorul cu mărimi de pornire pretențioase ; valoarea lui este influențată de parametrii celor două înfășurări, în special de reactanțele de dispersie.

În Capitolul II au fost prezentate relațiile parametrilor rotorici necesari pentru realizarea mărimilor de pornire m_p și i_p . Ele sînt - a se vedea relațiile (2.24), (2.27), cu o anumită aproximație :

$$R'_{2p} \approx \frac{m_p}{i_{2p}^2} \cdot \frac{m_1 U_1^2}{P_m} \quad (3.46)$$

$$Z_p \approx \frac{i_{2p}^2}{m_p} R_{2p}' \approx \frac{m_1 U_1^2}{i_{2p}^2 P_m} \quad (3.47)$$

(admițînd că $k_e = U_{e1}/U_{1n} \rightarrow 1$, $\cos \psi_2 \rightarrow 1$), respectiv

$$X_p \approx R_{2p}' \frac{\sqrt{i_{2p}^2 - m_p^2}}{m_p} \quad (3.48)$$

dacă se neglijează rezistența R_1 față de rezistența R_{2p}' , mult mai mare în cazul motoarelor cu mărimi de pornire pretențioase decît R_1 .

Relațiile (3.46) și (3.47), raportate la corespondentele lor pentru motoare de serie, scot în evidență că :

$$\frac{R_{2p}'}{R_{2p}^*} = \frac{m_p}{m_p^*} \left(\frac{i_{2p}^*}{i_{2p}} \right)^2 \quad (3.49)$$

și

$$\frac{Z_p}{Z_p^*} \approx \frac{i_{2p}^*}{i_{2p}} \quad (3.50)$$

sau valori supraunitare, în special raportul R_{2p}'/R_{2p}^* .

Aceste rezultate sînt absolut normale, avînd în vedere necesitatea în primul rînd, al micșorării curentului de pornire și în al doilea rînd creșterea cuplului de pornire.

Pentru valorile care vin în considerare la motoarele asincrone cu mărimi de pornire pretențioase ($m_p = 2,6 - 3$, $i_{2p} = 4 - 5,5$), rezistența R_{2p}' , de obicei, are o valoare

$$R_{2p}' \gg 2 R_{2p}^*$$

în timp ce impedanța echivalentă de pornire

$$Z_p \approx (1,2 - 1,6) Z_p^*$$

De exemplu, la $i_{2p} = 5$ față de $i_{2p}^* = 6$ și $m_p = 2,8$ față de $m_p^* = 1,8$, rezultă $R_{2p}' = 2,24 R_{2p}^*$, și respectiv $Z_p/Z_p^* = 1,2$.

În ceea ce privește reactanța X_p în comparație cu reactanța X_p^* , raportul este :

$$\frac{X_p}{X_p^*} = \frac{R_{2p}'}{R_{2p}^*} \cdot \frac{m_p^*}{m_p} \sqrt{\frac{i_{2p}^2 - m_p^2}{i_{2p}^{*2} - m_p^{*2}}} \approx \left(\frac{i_{2p}^*}{i_{2p}}\right)^2 \sqrt{\frac{i_{2p}^2 - m_p^2}{i_{2p}^{*2} - m_p^{*2}}} \quad (3.51)$$

Cresterea necesară a reactanței echivalente de pornire la motoare cu mărimi de pornire pretențioase este mult mai modestă decât aceea a rezistenței R_{2p}' și chiar a impedanței Z_p .

În Tabelul T 3.1 se prezintă, în sprijinul celor afirmate, valoarea raportului X_p/X_p^* calculat cu relația (3.51) pentru cazul în care $m_p^* = 1,8$, $i_p^* = 6$.

Pentru i_{2p} (i_{2p}^*) s-a considerat că ele sînt cu circa 25% mai mari decât i_p , adică $i_{2p} = 1,25 i_p$; $i_{2p}^* = 1,25 i_p^*$.

Tabelul 3.1.

i_p	4	4,5	5
m_p			
2,4	1,3555	1,2722	1,1414
2,6	1,3198	1,2179	1,124
2,8	1,2802	1,1912	1,10514
3,0	1,2361	1,1618	1,0844

Se observă că la valori reduse, dar nu exagerat de mici ale lui i_p ($i_p = 4,5 - 5$)

$$X_p = (1,25 - 1,1)X_p^*,$$

valoarea ei mărindu-se mai sensibil la micșorarea lui i_p (de exemplu $i_p = 4$).

Reactanțele de dispersie primare fiind practic aceleași la cele două motoare, după cum arată raportul :

$$\frac{X_1}{X_1^*} = \frac{N_1^2 L \lambda_1}{N_1^{*2} L^* \lambda^*} = \frac{1}{\gamma} \cdot \gamma \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_1^*} = \frac{\lambda_1}{\lambda_1^*} \approx 1 \quad (3.52)$$

rezultă că motoarele analizate, chiar dacă se impune un cuplu m_p mare și un curent i_p spre limită 3,5, au nevoie de o reactanță de pornire rotorică X'_{2p} puțin mai mare decât motoarele de serie :

$$X'_{2p} > X'_{2p}^* \quad (3.53)$$

(ele au o valoare relativ apropiată).

Tot în Capitolul II s-a arătat că se poate considera că :

$$X'_{2n} \approx \frac{(R'_{2p} - R'_{2n})^2}{X'_{E2p}} + X'_{2p} \quad (3.54)$$

unde reactanța rotorică echivalentă a celor două șiruri de bare, la pornire, conectate în paralel, poate fi aproximată

$$X'_{E2p} \approx 0,75 X'_{2p} \quad (3.55)$$

(admițînd că $X'_{c2p} \approx 0,25 X'_{2p}$).

La neglijaarea lui R'_{2n} față de R'_{2p} , relația (3.54) devine, avînd în vedere și relația (3.55) :

$$X'_{2n} = \frac{R'_{2p}{}^2 + 0,75 X'_{2p}{}^2}{0,75 X'_{2p}} \quad (3.56)$$

Considerînd că $X'_{2p} = (1,25 - 1,5)X_1$, ea poate fi exprimată

în funcție de X_p , cu aproximație, ca fiind :

$$X_{2p}' = X_p / 1,7$$

Tinând seama de relația (3.48) reactanța X_{2p}' se poate exprima în funcție de R_{2p}' sub forma :

$$X_p \approx \frac{R_{2p}'}{1,7} \cdot \frac{\sqrt{i_{2p}^2 - m_p^2}}{m_p} \quad (3.57)$$

Raportul $(\sqrt{i_{2p}^2 - m_p^2})/m_p$ variază între circa 1,3 - 2,7, după cum rezultă din Tabelul T 3.2, deci în medie se poate considera că este aproximativ egal cu 2.

Tabelul 3.2.

i_p	4	4,5	5	5,5
m_p				
2,4	1,8276	2,1197	2,4045	2,6344
2,6	1,6426	1,9184	2,186	2,4478
2,8	1,4796	1,7423	1,9956	2,2425
3,0	1,334	1,5861	1,8276	2,062

Rezultă că în medie $X_p = 1,15R_{2p}'$, cu observația că la valori $m_p \geq 2,6$ și curenți de pornire foarte reduși ($i_p \leq 4,5$), reactanța X_{2p}' rezultă mai mică decât rezistența rotorică R_{2p}' - a se vedea relația (3.57) și Tabelul T 3.2.

De exemplu, la $m_p = 2,6 - 3$ și $i_p = 4$ rezultă :

$$X_p = (0,966 - 0,785)R_{2p}'$$

dacă luăm în considerare datele din Tabelul T 3.2.

În aceste condiții, reactanța X_{2n}' necesară obține valori mai

mări, uneori sensibil mai mari, decât rezistența R_{2p}' . Pentru mărimile de pornire considerate anterior, conform relației (3.56) se ajunge la concluzia că :

$$X_{2n}' \approx (2,346 - 2,4835)R_{2p}' \quad (3.58)$$

Desigur că, datorită ipotezelor simplificatoare admise, rezultatul obținut nu este riguros exact ; se poate însă afirma, pe baza celor deduse, că la motoarele cu mărimi de pornire pretențioase reactanța rotorică nominală X_{2n}' rezultă în mod inevitabil relativ mult mai mare decât rezistența rotorică la pornire R_{2p}' , ea însăși destul de mult superioară rezistenței R_{2p}' a motorului de serie corespondent.

Aceasta înseamnă că motoarele cu mărimi de pornire pretențioase, pentru a se putea realiza cu mărimile de pornire prescrise, trebuie dimensionate cu o reactanță de dispersie X_{2n}' mult mai mare decât aceea a motorului de serie corespondent.

Efectul imediat este acela că la un motor cu mărimi de pornire pretențioase nu se poate obține un factor de putere la nivelul celui al motoarelor obișnuite, ceea ce impune ca la fixarea datelor de proiectare să se admită, în mod necesar, un factor de putere relativ mult inferior celui ce este prevăzut pentru motorul de serie uzual.

În baza rezultatelor obținute (este drept, aproximative) în cele de mai sus, ca și a experienței de realizare a unor motoare cu mărimi de pornire pretențioase, se poate aprecia că în funcție de putere, turație, de mărimile de pornire impuse, valoarea factorului de putere pe care se poate conta este :

$$\cos \varphi_n = \cos \varphi_n^* - (0,06 - 0,1) \quad (3.59)$$

Din considerentele dezvoltate se desprind următoarele concluzii privind particularitățile motoarelor asincrone cu mărimi de pornire pretențioase :

a) O proiectare rațională din punct de vedere economic a acestor motoare impune sacrificii în ceea ce privește valorile mărimilor η_n și în special $\cos \varphi_n$; impunerea, pentru aceste mărimi,

a acelorași valori ca la motorul de serie corespondent reprezintă un deziderat care nu poate fi respectat, în condiții de execuție a mașinii cu caracteristici tehnico-economice corespunzătoare ;

b) La determinarea dimensiunilor principale ale motoarelor asincrone cu mărimi de pornire pretențioase este corect ca stabilirea valorii lui S_1 din relația (3.33) să se bazeze pe valori ale lui η_n și $\cos \psi_n$ determinate pe baza relațiilor (3.45) și (3.59).

3.4. Problema cuplului de răsturnare al motoarelor în dublă colivie cu mărimi de pornire pretențioase.

Notînd cu $X_n = X_1 + C_1 X'_{2n}$ și neglijînd în relația (2.8) rezistența R_1 , evident mult mai mică decît X_n , cuplul de răsturnare al unui motor asincron devine :

$$M_k \approx \frac{m_1 U_1^2}{2C_1 \Omega_1 X_n} \quad (3.60)$$

Pe de altă parte, cuplul nominal este :

$$M_n = \frac{P_i}{\Omega_1} = \frac{m_1 U_{e1} I'_{2n} \cos \psi_{2n}}{\Omega_1} \quad (3.61)$$

unde $U_{e1} = k_e U_1$. Cum pentru valorile obișnuite : $C_1 = 1,015 - 1,035$, $k_e = 0,96 - 0,98$, $\cos \psi_{2n} = 0,96 - 0,98$, se poate admite că :

$$C_1 k_e \cos \psi_{2n} \approx 1$$

rezultă că expresia cuplului de răsturnare relativ m_k se poate scrie sub forma :

$$m_k = \frac{M_k}{M_n} \approx \frac{U_1}{I'_{2n}} \cdot \frac{1}{2C_1 X_n} \quad (3.62)$$

La motoarele cu mărimi de pornire pretențioase, reactanța X_n are o valoare mult sporită (datorită valorii mai mari a reac-

tantei X'_{2n}) față de motorul de serie corespondent. In consecință

$$\frac{m_k}{m_k^*} \approx \frac{X_n^*}{X_n} \quad (3.63)$$

este întotdeauna subunitar. In mod determinat, deci, cuplul de răsturnare (ca valoare, relativ) al motoarelor asincrone cu mărimi de pornire pretentioase este mai mic decât cel al motorului de serie corespondent. Această afirmație este, cantitativ, cu atât mai valabilă cu cât indicele de calitate al pornirii, $q_p = m_p/i_p$, este mai mare.

Pentru a justifica această afirmație și pentru o apreciere cantitativă a influenței mărimilor de pornire asupra lui M_k , se observă²⁵ că reactanța echivalentă la pornire a unui motor asincron se poate exprima sub forma :

$$X_p = \sqrt{Z_p^2 - R_p^2} = \sqrt{\left(\frac{U_1}{i_{2p} I'_{2n}}\right)^2 - (R_1 + C_1 R'_{2p})^2} \approx$$

$$\approx \sqrt{\left(\frac{U_1}{i_{2p} I'_{2n}}\right)^2 - \left(C_1 \frac{m_p}{i_{2p}} \cdot \frac{k_e U_1 \cos \psi_{2n}}{I'_{2n}}\right)^2}$$

sau încă, în ipoteza mai sus amintită,

$$X_p \approx \frac{U_1}{i_{2p} I'_{2n}} \sqrt{1 - \left(\frac{m_p}{i_{2p}}\right)^2} \quad (3.64)$$

unde $m_p/i_{2p} = g_{2p}$ este cu ceva mai mic din punct de vedere valoric decât $g_p = m_p/i_p$.

Inlocuind în (3.62) raportul U_1/I'_{2n} sub forma sa rezultată din (3.64), se obține că :

$$m_k \approx \frac{i_{2p}}{2k_X \sqrt{1 - g_{2p}^2}} \quad (3.65)$$

dacă s-a notat $k_X = X_n/X_p$.

Relația (3.65) conduce imediat la relația :

$$\frac{m_k}{m_p} = \frac{1}{2k_X g_{2p} \sqrt{1 - g_{2p}^2}} \quad (3.66)$$

Raportul k_X , pentru motoarele asincrone cu mărimi de pornire uzuale și respectiv pretențioase, are valori cuprinse între aproximativ 1,25 - 1,65. Curba de dependență $m_k/m_p = f(g_p)$ care rezultă conform relației (3.66), în care s-a considerat valoarea medie $k_X = 1,5$ și că $g_p = 1,25 g_{2p}$ ($i_{2p} = 1,25 i_p$), este reprezentată în Figura 3.1. Chiar dacă ea este aproximativă, prin compensările

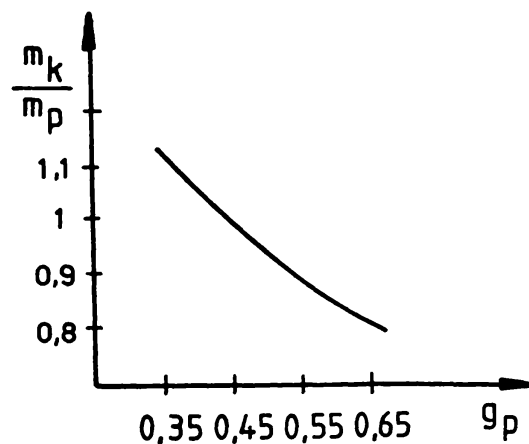


Figura 3.1 Reprezentarea grafică a curbei de dependență $m_k/m_p = f(g_p)$

introduse datorită ipotezelor și valorilor arbitrare admise, valorile reale ale raportului m_k/m_p nu diferă, probabil, cu mai mult de +10% față de cele din grafic.

Din curba obținută rezultă că $m_k > m_p$, doar pentru motoarele asincrone caracterizate prin indicele de calitate la pornire $g_p > 0,45$; dacă g_p are o valoare mai redusă (cazul motoarelor cu mărimi de pornire pretențioase), cuplul de răsturnare rezultă de o valoare mai mică decât cuplul de pornire. Aceasta înseamnă că la motoarele în dublă colivie și cu mărimi de pornire pretențioase :

a) nu se poate impune, la proiectare, un $m_k > m_p$, aceasta fiind irealizabil, dacă motorul dimensionat respectă valorile impu-

șe pentru m_p și i_p ;

b) în mod necesar, caracteristica cuplului $M = f(s)$ prezintă în domeniul $s_k \div s = 1$ o șea (a se vedea Figura 3.2), lucru de altfel semnalat și în literatură³⁴.

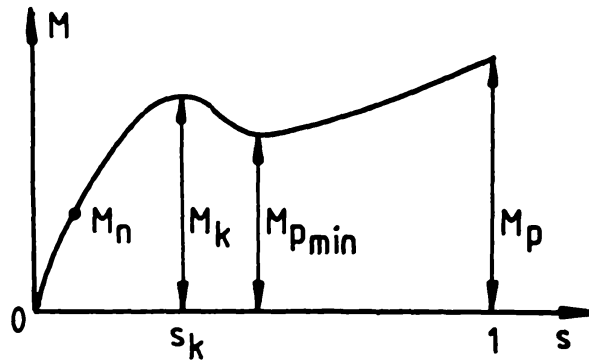


Figura 3.2 Reprezentarea caracteristicii cuplului $M = f(s)$ la motoarele în dublă colivie cu mărimi de pornire pretențioase.

Deși poate să pară paradoxal, primul efect semnalat nu prezintă în fapt nici un dezavantaj pentru motorul asincron în dublă colivie cu mărimi de pornire pretențioase. Într-adevăr, prin faptul că $m_p = 2,6 - 2,8 - 3$, cuplul de răsturnare relativ, de exemplu, $m_k = 0,8 m_p = 2,4$ este întrutotul satisfăcător. Afirmatia este valabilă pentru întreg domeniul privind de m_p , respectiv i_p , caracteristic unui motor în dublă colivie cu mărimi de pornire pretențioase, așa cum rezultă și din Tabelul T 3.3, unde pentru calculul lui m_k/m_p cu relația (3.66), s-a considerat că $g_p = i_p/1,25$, iar $k_X = 1,5$, respectiv din Tabelul 3.4.

Tabelul 3.3.

i_p	3,5	4	4,5	5
m_p				
2,6	0,6974	0,750469	0,813242	0,8811
2,8	0,677337	0,713459	0,772096	0,832236
3,0	0,667353	0,694444	0,738853	0,7916

Valorile lui $m_k/m_p = f(i_p, m_p)$ conform relației (3.66)

Valorile din Tabelul T 3.4 rezultă prin simpla înmulțire a valorii lui m_k/m_p din Tabelul T 3.3 cu m_p considerat.

Tabelul T 3.4

i_p	3,5	4	4,5	5
m_p				
2,6	1,813	1,9512	2,1144	2,29
2,8	1,8979	2,0116	2,1618	2,3302
3,0	2,0035	2,0833	2,2165	2,3748

valorile lui $m_k = f(i_p, m_p)$ în baza rezultatelor din Tabelul T.3.3.

Tabelul T 3.4 arată că în situațiile cele mai modeste ($m_p = 2,6$ și $i_p = 3,5$), cuplul de răsturnare relativ rezultă în jur de 1,8 pentru ca la toate celelalte valori perechi m_p, i_p să rezulte un cuplu $m_k \cong 1,9 - 2,4$. Toate aceste valori pot fi considerate (așa cum se subliniază³⁴) ca satisfăcătoare, suprasarcinile mecanice care intervin în practica exploatării nedepășind decît excepțional cu 40% din cuplul M_n .

O observație care rezultă din datele din Tabelul T 3.4 și care merită a fi reținută este că, din punct de vedere al cuplului m_k , este preferabil, cînd se impune un curent i_p redus, să se impună un cuplu m_p mai mare.

Mai important este cel de-al doilea efect subliniat. Într-adevăr, dacă cuplul $M_{p_{min}}$ (a se vedea Figura 3.2), rezultat al deformației curbei cuplului de la forma sa clasică, nu rămîne superior cuplului de sarcină $M_s(s = s_{p_{min}})$, motorul se fixează la o turație $n = n_1(1 - s_{p_{min}}) \gg n_n$, de regim. La proiectarea motoarelor asincrone cu mărimi de pornire pretențioase trebuie să se aibă, deci, în vedere și acest aspect.

3.5. Problema raportului dintre rezistențele R'_i și R'_e , α .

Seaua curbei cuplului dezvoltate de un motor asincron în dublă colivie este influențată în mare măsură de valoarea mărimii α .

Acest lucru este analizat în amănunțime în literatură³⁴, unde se demonstrează că șeaua respectivă care intervine în curba $M = f(s)$ a unui motor asincron în dublă colivie rezultă ca fiind cea mai pronunțată în cazul în care $\alpha = \alpha_0 = R'_{E_{2n}} / X'_{E_{2n}}$. Ea se atenuază odată cu creșterea lui α , față de valoarea α_0 , pentru ca să dispară practic (Figura 3.3) pentru acel α pentru care cercurile de lucru C_1 și de pornire C_p ale motorului sînt ortogonale.

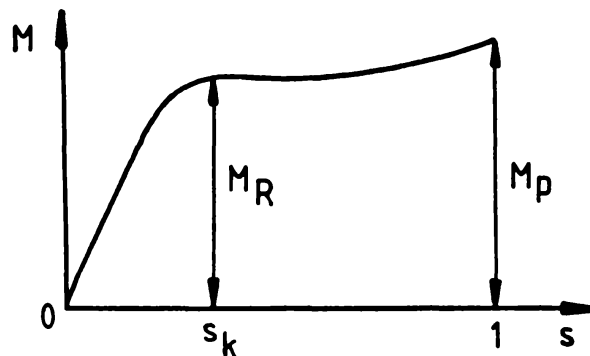


Figura 3.3 Représentarea curbei cuplului motorului asincron în dublă colivie pentru α care are loc când cercurile de lucru și de pornire sînt ortogonale.

Rezultă că înșeuarea curbei cuplului este cu atît mai mică cu cît α este mai mare decît $\alpha = \alpha_0$, pentru ca la $\alpha = \alpha_T$ (cînd cercurile C_1 și C_p sînt ortogonale) șeaua din curba cuplului să devină nesensibilă. La creșterea lui α peste valoarea α_T șeaua curbei cuplului se atenuază din nou.

În literatură se precizează că situația favorabilă în care șeaua dispăre practic din curba cuplului³⁴ intervine dacă la $X'_{E_{2n}} / R'_{E_{2n}}$ egal cu 3,6 și 9, $\alpha = \alpha_T$ este aproximativ egal respectiv cu $1,1 \cdot \alpha_0$; $2,3 \cdot \alpha_0$; $3,6 \cdot \alpha_0$.

Valoarea lui $\alpha = \alpha_T$ în funcție de $X'_{E_{2n}} / R'_{E_{2n}}$, pe baza acestor precizări, este reprezentată în Figura 3.4. Practic, curba respectivă poate fi asimilată cu dreapta :

$$\alpha_T = 0,3505 + 0,0055 \frac{X'_{E_{2n}}}{R'_{E_{2n}}} \quad (3.67)$$

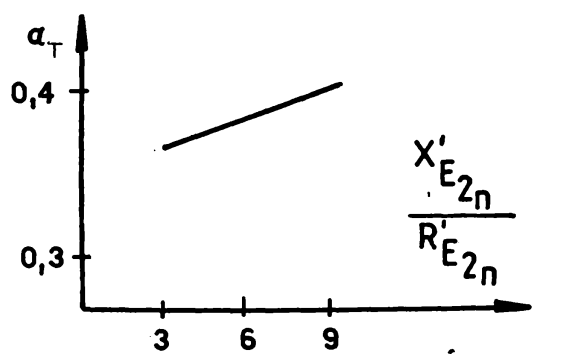


Figura 3.4. Reprezentarea valorii lui $\alpha = \alpha_T$ în funcție de $X'_{E_{2n}} / R'_{E_{2n}}$.

Rezultă că la alegerea lui α , în cazul motoarelor asincrone în dublă colivie cu mărimi de pornire pretențioase, când se adoptă în mod concret această mărime dată aproximativ de relația (2.35), valoarea obținută cu (2.35) trebuie comparată cu valoarea obținută cu (3.67).

Pentru o valoare oarecare $X'_{E_{2n}} / R'_{E_{2n}}$, factorul de creștere față de α_0 este

$$k = 0,0055 + 0,3505 \frac{R'_{E_{2n}}}{X'_{E_{2n}}} \quad (3.68)$$

Relația (3.67) scoate în evidență că pentru valorile obișnuite ale raportului $X'_{E_{2n}} / R'_{E_{2n}}$ (cuprinse între 3 și 9), pentru ca în curba cuplului șeaua amintită "să dispară", mărimea α ar trebui aleasă apropiată de valoarea 0,4.

În mod obișnuit, la valorile m_p și i_p care intervin la motoarele cu mărimi de pornire pretențioase, valoarea lui α care se obține cu relația (2.35) este relativ mai mică decât α_T . Pentru că adoptarea lui $\alpha = \alpha_T$ ar determina, cu siguranță, abateri destul de sensibile ale mărimilor m_p și i_p de la cele impuse, soluția constă într-un compromis. Cu alte cuvinte, se adoptă un α cu ceva mai mare decât cel rezultat cu relația (2.35), dar mai mic decât α_T . În aceste condiții :

a) mărimile m_p și i_p vor rezulta cu o anumită abatere față de valorile impuse (evident, ele trebuie să se încadreze în limitele admise de STAS) ;

b) curba cuplului, prezentînd o anumită șea, valoarea acesteia este atenuată, astfel ca $M_{p_{min}}$ să rămînă superior cuplului de sarcină corepunzător turației la care intervine $M_{p_{min}}$.

Din cele arătate rezultă concluzia că la motoarele în dublă colivie cu mărimi de pornire pretențioase nu este important să se obțină numai mărimile m_p și i_p , ci și o curbă a cuplului cu o șea cît mai puțin pronunțată, care să asigure procesul de pornire pînă la atingerea regimului de lucru.

3.6. Concluzii.

Analiza expusă în paragrafele anterioare din acest capitol permite să se tragă următoarele concluzii:

1) Motoarele în dublă colivie cu mărimi de pornire pretențioase trebuie concepute ca mașini de lungime mai mare și diametru întrucîtva micșorat în raport cu motoarele de serie corespondente.

2) Pentru obținerea mărimilor de pornire m_p și i_p , alunecarea acestor motoare trebuie admisă mai mare decît a motoarelor de serie corespondente. În strînsă legătură cu aceasta, și rezistența lor rotorică R_{2n}' trebuie admisă mai mare.

3) La fixarea datelor de proiectare trebuie să se aibă în vedere următoarele:

a) Randamentul și factorul de putere impuși trebuie să fie, în mod necesar, mai mici decît cele ale motorului de serie corespondent.

b) Impunerea unor valori excesiv de pretențioase (peste cele efectiv necesare) pentru m_p și i_p determină dificultăți (sau chiar imposibilitatea de realizare) în proiectarea mașinii.

c) Atît pentru obținerea cuplului și a curentului de pornire date, cît și pentru alura curbei cuplului, alegerea potrivită a mărimii α este deosebi de importantă. În orice caz, ea urmează să aibă o valoare mai ridicată (mai mare decît 0,2) față de motoarele în dublă colivie de serie.

4) Determinarea dimensiunilor principale ale motorului - care stau la baza întregului proces de proiectare - urmează a se face adoptînd un factor $\lambda = L/\tau$ potrivit, mai mare decît la motoa-

re de serie. In această situație, la volum de materiale active (cupru, fier, aluminiu) comparabil, motoarele în dublă colivie cu mărimi de pornire pretențioase trebuie proiectate cu un număr de spire statorice mai mic decât cel al motorului de serie corespondent.

5) Este de dorit ca înfășurarea statorică a acestui tip de motor să fie solicitată mai modest (pentru limitarea rezistenței R_1), iar înfășurarea rotorică spre limita admisibilă. Pentru evitarea, pe cât posibil, a cuplurilor parazite, este indicat ca scurtarea pe partea statorică să corespundă la $y/\tau = 5/6$, respectiv ca barele rotorului să se execute cu o înclinare potrivită (obignuit $\approx t_1$).

CAPITOLUL IV.

STUDIUL MODULUI DE DETERMINARE CORECTA, PRIN CALCUL, A PARAMETRIILOR ROTORICI AI ROTORULUI IN DUBLA COLIVIE TURNAT IN ALUMINIU.

4.1. Considerații generale.

Prin parametrii mașinilor electrice, după cum este cunoscut, se înțeleg rezistențele și inductivitățile (reactanțele) mutuale și de dispersie ale circuitelor mașinii, care determină comportarea ei în serviciu și desfășurarea proceselor în mașină.

Calculul precis al parametrilor principali are o mare importanță în practică și în teoria mașinilor electrice de curent alternativ ca și al mașinilor de curent continuu. Cunoașterea parametrilor permite stabilirea modului de funcționare în sarcină a mașinii, precum și a condițiilor stabilității statice și dinamice.

O importanță deosebită o are cunoașterea parametrilor mașinilor moderne, caracterizate printr-o utilizare la maximum a materialelor active.

În acest capitol se analizează modul de determinare cât mai corectă, prin calcul, a parametrilor rotorici ai rotorului în dublă colivie turnat în aluminiu, având în vedere că în literatură el este asimilat cu un rotor cu două colivii separate, neglijându-se faptul că, în acest caz, și istmul dintre cele două rînduri de crestături (de pornire și de lucru) conține material conductor.

4.2. Expunerea problemei.

Rotorul mașinii cu dublă colivie este prevăzut cu două colivii plasate în două rînduri de crestături în general suprapuse, unite printr-un istm. Dar, în cazul rotorului în dublă colivie turnat în aluminiu avem, în realitate, o singură colivie, avînd secțiunea barei de o formă particulară. La motoarele de puteri mici și mijlocii, la care se folosește turnarea în aluminiu, forma de colivie rotorică turnată în aluminiu cea mai potrivită, din punct de vedere tehnologic și funcțional, este cea reprezentată în Figura 4.1.

și ca urmare este și cea mai des folosită. La o asemenea formă de crestătură, aluminiul turnat (cald) poate să ocupe cu ușurință întreg spațiul disponibil al crestăturii ; de asemenea, prin forma ovală a crestăturii interioare (simbol : indice "i"), se poate asigura o inducție a cîmpului magnetic în dinții din această zonă de vîloare practic constantă.

Din aceste motive, de altfel, pentru rotoarele în dublă colivie turnate în aluminiu, în toate manualele de specialitate se propune folosirea acestei forme de crestături.

Nefiind un rotor cu două colivii distincte în adevăratul înțeles al cuvîntului, separate complet, relațiile de calcul ale parametrilor rotorici propuse în literatură pentru cazul respectiv, considerînd că coliviile exterioară (indice "e") și interioară (indice "i") sînt conectate în paralel, nu pot duce la valori corecte, ci numai la valori aproximative.

Am ajuns la concluzia că trebuie să analizez problemele stabilirii :

1) unei relații pentru calculul reactanței X'_{2n} , care să corespundă mai corect, cînd avem de-a face cu o colivie unică, cu bare de forma din Figura 4.1.

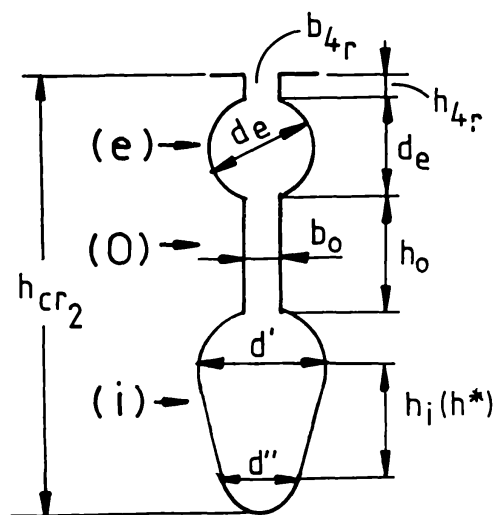


Figura 4.1. Forma de colivie rotorică turnată în aluminiu folosită în mod obișnuit.

2) unei relații pentru calculul reactanței X'_{2p} , în cazul crestăturii respective ;

3) unor relații pentru calculul rezistențelor R'_{2n} respectiv

R'_{2p} corespunzătoare.

4.3. Calculul reactanței X'_{2n} .

Este cunoscut faptul că în cazul înfășurărilor de mașini electrice, reactanța de dispersie este raportul :

$$X_{\sigma} = \frac{U_{e\sigma}}{I} = 2\pi f L_{\sigma} \quad (4.1)$$

unde : L_{σ} : inductivitatea de dispersie

$U_{e\sigma}$: tensiunea electromotoare

f : frecvența

Ultima egalitate din relația (4.1) este valabilă dacă se neglijează saturația.

Inductivitatea de dispersie L_{σ} este dată de relația³³ :

$$L_{\sigma} = N^2 \mu_0 L \lambda_{\sigma} \quad (4.2)$$

unde : N : numărul de spire

μ_0 : permeabilitatea magnetică în vid ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$)

λ_{σ} : permeanța magnetică specifică (permeanța magnetică a fluxului de dispersie pe unitatea de lungime).

Pentru a determina reactanța X'_{2n} a coliviei duble în aluminiu trebuie deci stabilită întâi permeanța specifică λ_{cr2} , reală, a creștăturii rotorice reprezentată în Figura 4.1.

Permeanța specifică λ_{cr} pentru o anumită formă a unei creștături rezultă sub forma de mai jos, conform³³ (p.260, relația (377))

$$\lambda_{cr} = \int_0^{h_c} H'^2 b dx \quad (4.3)$$

unde : H' : intensitatea câmpului magnetic, pe unitatea de solenitație ;

b : lățimea creștăturii ;

h_c : înălțimea creștăturii

Calculul lui λ_{c_r} în cazul cel mai simplu, cînd creștătura și bara sînt dreptunghiulare (Figura 4.2), deci de lățime constantă, în condițiile general acceptate, cînd liniile de cîmp magnetic se închid perpendicular pe pereții creștăturii, se poate executa simplu observînd c_ă B , respectiv $H = B/\mu_0$ variază liniar (la fel și H').

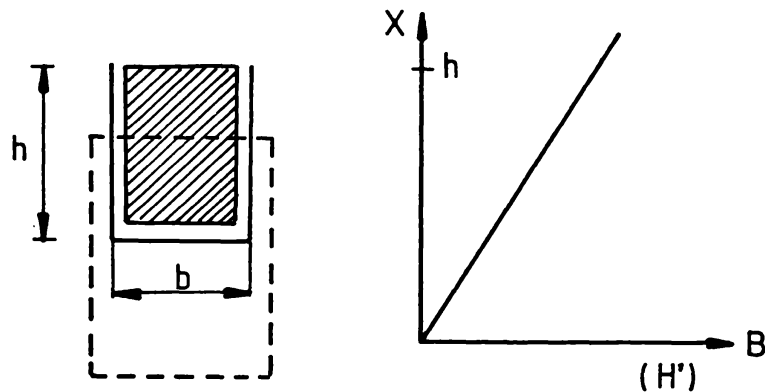


Figura 4.2. Configurația cîmpului magnetic în cazul unei creștături și unei bare dreptunghiulare ;
Curba de variație $H' = f(h)$

Intensitatea de cîmp magnetic

$$H' = \frac{H}{N \cdot I} = \frac{1}{b} \cdot \frac{x}{h}$$

Aplicînd în acest caz relația (4.3) rezultă succesiv :

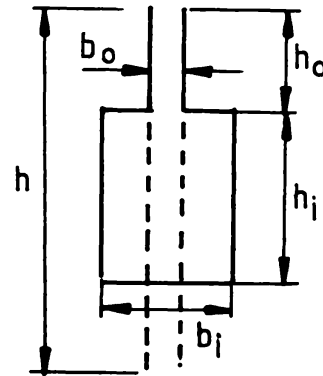
$$\begin{aligned} \lambda_{c_r} &= \int_0^h \left(\frac{1}{b} \cdot \frac{x}{h} \right)^2 b \, dx = \frac{1}{bh^2} \int_0^h x^2 \, dx = \\ &= \frac{1}{bh^2} \cdot \frac{1}{3} \left| x^3 \right|_0^h = \frac{1}{3bh^2} (h^3 - 0) = \frac{h}{3b} \end{aligned} \quad (4.4)$$

În cazul creștăturii analizate (Figura 4.1) urmează a se raționa similar, ținînd seama de forma reală a creștăturii. Pentru aceasta să observăm c_ă creștătura din partea inferioară ($i + 0$)

poate fi echivalată, cu o bună aproximație, cu o creștătură (în același timp bară) în formă de T, și cu dimensiunile din Figura 4.3, unde

$$b_i \approx \frac{d_1 + d_2}{2}, \quad h_i = h^*$$

Figura 4.3. Forma echivalentă în T a părții inferioare a creștăturii reprezentată în Figura 4.1.



Cu această echivalare, permeanța specifică a creștăturii în T se poate determina folosind relația⁵:

$$\lambda_{cT} = \int_0^{h_i} \frac{b_i}{(b_i h_i + b_o x)} \cdot x^2 dx + \int_0^{h_o} \frac{(b_i h_i + b_o x)^2}{(b_i h_i + b_o h_o)^2} dx \quad (4.5)$$

$$\text{Notînd } \frac{b_i}{b_o} = u \text{ și } b_i h_i + b_o h_o = q \quad (4.6)$$

rezultă că :

$$\lambda_{cT} = \frac{b_i}{q^2} \frac{1}{3} \left| x^3 \right|_0^{h_i} + \frac{b_o}{q^2} \frac{1}{3} \left| (u h_i + x)^3 \right|_0^{h_o}$$

$$\lambda_{cT} = \frac{b_i}{q^2} \frac{1}{3} \left| h_i^3 \right| + \frac{b_o}{q^2} \frac{1}{3} \left| (u h_i + h_o)^3 - (u h_i)^3 \right|$$

Inmulțim primul termen cu $\frac{3hb_o}{3hb_o}$ (semnificația înălținii echivalente h este dată în ultima relație, (4.7)). Rezultă :

$$\lambda_{c_T} = \frac{b_i h_i^3}{3q^2} \frac{3hb_0}{3hb_0} + \frac{b_0}{3q^2} \left[(uh_i + h_0)^3 - u^3 h_i^3 \right];$$

dacă scoatem în factor comun pe $\frac{h}{3b_0}$:

$$\begin{aligned} \lambda_{c_T} &= \frac{h}{3b_0} \left[\frac{3b_0}{h} \cdot \frac{b_i h_i^3}{3q^2} + \frac{3b_0}{h} \cdot \frac{b_0}{3q^2} \left[(uh_i + h_0)^3 - u^3 h_i^3 \right] \right] = \\ &= \frac{b_i}{3q^2} \cdot h_i^3 + \frac{b_0}{3q^2} \left[(uh_i + h_0^3) - (uh_i)^3 \right] \end{aligned}$$

Folosind notațiile :

$$u = \frac{b_i}{b_0} ; \quad v = \frac{h_i}{h} ; \quad h = \frac{q}{b_0} \quad (4.7)$$

se obține în continuare :

$$\begin{aligned} \lambda_{c_T} &= \frac{h}{3b_0} \left[\frac{3b_0}{h} \frac{b_i h_i^3}{3q^2} + \frac{3b_0}{h} \cdot \frac{b_0}{3q^2} \left(\frac{b_i^3}{b_0^3} h_i^3 + \frac{b_i^2}{b_0^2} h_i^2 h_0 + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{3b_i}{b_0} h_i h_0^2 + h_0^3 - \frac{b_i^3}{b_0^3} h_i^3 \right) \right] = \\ &= \frac{h}{3b_0} \left[\frac{b_0}{h} \frac{b_i h_i^3}{q^2} + \frac{b_0^2}{hq^2} \left(\frac{b_i^3}{b_0^3} h_i^3 + \frac{3b_i^2}{b_0^2} h_i^2 h_0 + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{3b_i}{b_0} h_i h_0^2 + h_0^3 - \frac{b_i^3}{b_0^3} h_i^3 \right) \right] = \\ &= \frac{h}{3b_0} \left[\frac{b_0 b_i h_i^3}{hq^2} + \frac{b_0^2}{hq^2} \frac{b_i^3 h_i^3}{b_0^3} + \frac{b_0^2}{hq^2} \frac{3b_i^2}{b_0^2} h_0 h_i^2 + \frac{b_0^2}{hq^2} \frac{3b_i}{b_0} h_i h_0^2 + \right. \\ &\quad \left. + \frac{b_0^2}{hq^2} h_0^3 - \frac{b_0^2}{hq^2} \frac{b_i^3 h_i^3}{b_0^3} \right] \end{aligned}$$

După efectuarea calculelor intermediare, rezultă :

$$\begin{aligned}\lambda_{c_T} &= \frac{h}{3b_0} \left[\frac{b_0^2 b_i h_i^3}{q^2} + \frac{3b_i^2 h_i^2 h_0}{q^2} + \frac{b_0 3b_i h_i h_0^2}{q^2} + \frac{b_0^2 h_0^3}{q^2} \right] = \\ &= \frac{h}{3b_0} \left[\frac{b_0^2 b_i h_i^3}{q^3} + \frac{3(b_i h_i)^2 h_0 b_0}{q^3} + \frac{3(b_0 h_0)^2 (b_i h_i)}{q^3} + \frac{b_0^3 h_0^3}{q^3} \right] = \\ &= \frac{h}{3b_0} \left[\frac{b_0^2 b_i h_i^3}{q^3} + \frac{(b_i h_i + h_0 b_0)^3}{q^3} - \frac{b_i^3 h_i^3}{q^3} \right]\end{aligned}$$

$$\text{Dar : } b_i h_i + b_0 h_0 = q$$

astfel că :

$$\lambda_{c_T} = \frac{h}{3b_0} \left[1 + \frac{b_0^2 b_i h_i^3}{q^3} - \frac{b_i^3 h_i^3}{q^3} \right]$$

Pentru că $h = \frac{q}{b_0}$ rezultă $q = hb_0$, λ_{c_T} rezultă în final

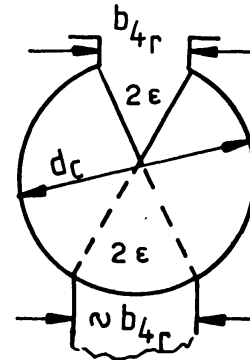
de forma :

$$\begin{aligned}\lambda_{c_T} &= \frac{h}{3b_0} \left[1 + \frac{b_0^2 b_i h_i^3}{(hb_0)^3} - \frac{b_i^3 h_i^3}{(hb_0)^3} \right] = \\ &= \frac{h}{3b_0} \left[1 + \frac{b_i}{b_0} \left(\frac{h_i}{h}\right)^3 - \left(\frac{b_i}{b_0}\right)^3 \left(\frac{h_i}{h}\right)^3 \right] = \\ &= \frac{h}{3b_0} \left[1 + uv^3 - u^3 v^3 \right] \quad (4.8)\end{aligned}$$

La mașinile asincrone cu dublă colivie se folosesc creștături la colivia de pornire, rotunde, cu deschideri în ambele părți (Figura 4.4). La aceste creștături distribuția componentei tangențiale a intensității câmpului magnetic pe periferia creștăturii se modifică⁶, ceea ce duce la modificarea formulei pentru calculul

permeanței specifice λ a acestei forme de crestătură.

Figura 4.4. Forma crestăturii de la colivie de pornire cu bare rotunde la motoarele în dublă colivie



Pentru crestătura cu deschideri în ambele părți, avem (derivata este notată cu "prim") conform datelor din literatură⁶ :

$$\lambda = \frac{4}{\pi} I_m \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{jJ_{2n-1}(kR_c)}{kR_c J'_{2n-1}(kR_c)} \left[\frac{\sin(2n-1)\epsilon}{(2n-1)\epsilon} \right]^2 \right\}$$

$$R = 4R_o |kR_c|^2 R_e \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{jJ_{2n-1}(kR_c)}{kR_c J'_{2n-1}(kR_c)} \left[\frac{\sin(2n-1)\epsilon}{(2n-1)\epsilon} \right]^2 \right\} \quad (4.9)$$

în care prin R_c s-a notat $\frac{d_c}{2}$.

Se deduce⁶ că factorul de micșorare a permeanței specifice la pornire datorită saturației este :

$$k_X = \frac{\lambda_s}{\lambda_o} = f(R_c \sqrt{\frac{\omega \mu_o}{\rho}}, 2\epsilon)$$

unde λ_o este permeanța specifică a crestăturii fără refulare de curent, iar λ_s când intervine acest fenomen.

Permeanța λ_o , care de fapt este λ ce ne interesează la funcționarea în regim de lucru, se poate calcula ca fiind :

$$\lambda_{c_o} = \lambda_o = \lim_{k \rightarrow 0} \lambda \cong \frac{4}{\pi} (0,75 - 0,50 \ln \frac{b_{4r}}{d_c}) \quad (4.10)$$

La rotoarele în dublă colivie în aluminiu, b_{4s} și b_o sînt de același ordin de mărime, astfel că putem considera că relația

(4.10) conduce la valori foarte apropiate de valoarea reală.

Cu acestea, permeanța specifică a creștăturii reprezentată în Figura 4.1 poate fi considerată ca fiind :

$$\lambda_{cr_2} \cong \lambda_{c_T} + \lambda_{c_0} \quad (4.11)$$

În cazul rotoarelor în colivie - a se vedea relațiile (4.1) și (4.2) - rezultă că :

$$X_{cr_2} = \omega \mu_0 L \cdot \lambda_{cr_2} = 2\pi f_1 \mu_0 L \lambda_{cr_2} \quad (4.12)$$

(s-a considerat $N = 1$ bară),
iar reactanța X_{cr_2} redusă la stator este :

$$X'_{cr_2} = kX_{cr_2} = k \cdot 2\pi f_1 \mu_0 L \lambda_{cr_2} \quad (4.13)$$

unde λ_{cr_2} este cel dat de relația (4.11), iar k este factorul de reducere a parametrilor rotorici la stator.

Relația pentru reactanța totală rotorică, redusă la stator, în regim nominal, va fi prin urmare :

$$X'_{2n} = X'_{cr_2} + X'_{\delta_2} + X'_{d_2} + X'_{f_2} = X'_{cr_2} + X'_{c_2} \quad (4.14)$$

unde prin X'_{c_2} s-a notat reactanța comună exterioară creștăturii (corespunzând dispersiilor în deschiderea creștăturii, diferențială și frontală - a inelelor).

O formă echivalentă a relației (4.14) este, evident,

$$X'_{2n} = k \cdot 2\pi f_1 \mu_0 L (\lambda_{cr_2} + \lambda_{\delta_2} + \lambda_{d_2} + \lambda_{f_2}) \quad (4.14')$$

4.4. Calculul reactanței X'_{2p} .

La pornire, când frecvența rotorică f_2 este egală cu frecvența statorică, curentul de pornire din barele rotorice cunoaște o puternică refulare, închizându-se în principal prin partea superioară a creștăturii. În literatură, relația de calcul al reactanței echi-

valente $X'_{E_2 p}$ al celor două rînduri de bare este dedusă considerînd că acestea sînt conectate în paralel, inclusiv pentru rotoarele turnate în aluminiu.

În cazul acestui tip de rotor însă, refularea curentului la pornire are loc într-o bară unică, de forma particulară reprezentată în Figura 4.1. În aceste condiții, ipoteza admisă în literatură și arătată mai sus are un caracter aproximativ; reactanța $X'_{E_2 p}$ calculată pe baza ipotezei respective va rezulta, în mod inevitabil mai mult sau mai puțin diferită de valoarea $X'_{cr_2 p}$, reală, ce corespunde barelor de colivie de forma din Figura 4.1.

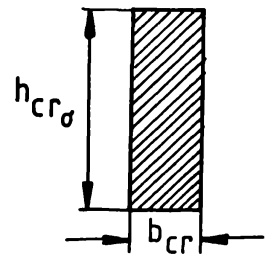
Mi-am propus să stabilesc expresia acestei reactanțe pe baza reactanței valabilă la sarcină normală, prin intermediul unui factor de micșorare a acesteia la pornire, k_x , determinat echivalînd creștătura reală (Figura 4.1) cu una dreptunghiulară care, din punct de vedere al dispersiei, se comportă la fel.

În acest scop am considerat creștătura dreptunghiulară de lățime b_{cr} și înălțime $h_{cr\sigma}$ (Figura 4.5), umplută cu material conductor (aluminiu), care se caracterizează prin permeanța specifică reală, λ_{cr_2} ; conform relației (4.4), aplicată acestei situații:

$$\lambda_{cr_2} = \frac{h_{cr\sigma}}{3b_{cr}} \quad (4.15)$$

unde λ_{cr_2} este permeanța specifică dată de relația (4.11).

Figura 4.5. O creștătură echivalentă dreptunghiulară de lățime b_{cr} și înălțime $h_{cr\sigma}$ umplută cu material conductor (aluminiu).



Rezultă că înălțimea creștăturii echivalente (din punct de vedere al dispersiei) cu creștătura reală (Figura 4.1) este:

$$h_{cr\sigma} = 3 \cdot b_{cr} \lambda_{cr_2} \quad (4.16)$$

"Înălțimea redusă" a barei respective, în situația când are

loc refularea curentului este dată, după cum este cunoscut, de relația :

$$\xi = \alpha_p h_{cr\sigma} \quad (4.17)$$

unde, în cazul barei și creștăturii din Figura 4.5 :

$$\alpha_p = \sqrt{\frac{\omega_1 \mu_0}{2 \rho}} = \sqrt{\frac{\pi f_1 \mu_0}{\rho}} \quad (4.18)$$

La valoarea $\rho_{Al} \approx 0,0435 \cdot 10^{-6} \Omega m$ și la înălțimi de creștătură h_{cr2} (vezi Figura 4.1) de ordinul mai mare decât 30 mm, rezultă $\xi > 2$.

În această situație, după cum se știe, se poate considera că factorul de micșorare a reactanței, față de cea din regim de lucru poate fi considerat⁵ :

$$k_x = \frac{3}{2\xi} \quad (4.19)$$

Rezultă că reactanța X'_{cr2p} se poate calcula cu relația :

$$X'_{cr2p} = k_x X'_{cr2} \quad (4.20)$$

unde X'_{cr2} este dată de relația (4.13), iar λ_{cr2} este cea care rezultă cu relația (4.11).

Relația pentru calculul reactanței de pornire rotorice totală (redușă la stator) este prin urmare :

$$X'_{2p} = X'_{cr2p} + X'_{c2s} \quad (4.21)$$

$$\text{în care } X'_{c2s} = X'_{\delta 2s} + X'_{d 2s} + X'_{f 2} \quad (4.22)$$

este reactanța de dispersie rotorice redusă comună, exterioară creștăturii ; în condițiile saturației care intervine la pornire, componentele lui X'_{c2s} se calculează simplu, cu relațiile recoman-

date în literatură.

4.5. Calculul rezistenței R'_{2n}

Deosebirea față de dubla colivie cu colivii distincte constă în aceea că la $s = s_n$, curentul I_2 se închide, practic în totalitate, prin barele interioare și printr-o cotă parte a istmului, după toate probabilitățile, ultima, de secțiune (înălțime) redusă (Figura 4.6).

Figura 4.6. Reprezentarea unei secțiuni prin barele interioare și printr-o cotă parte a istmului.



Rezistența R'_{cr2} este, deci, de puțin mai mică decât R'_i , a barei inferioare; ordinul de mărime al rezistenței R'_{2n} rămâne, deci, cu bună aproximație, același ca și în cazul considerării celor două colivii în paralel, adică:

$$R'_{cr2n} \approx R'_{E2n} \quad (4.23)$$

Se propune deci ca R'_{cr2n} să se calculeze cu relația de definiție a ei recomandată în literatură:

$$R'_{cr2} \approx \frac{R'_e R'_i}{R'_e + R'_i} \quad (4.24)$$

și deci:

$$R'_{2n} \approx R'_{cr2} + R'_{in} \quad (4.25)$$

4.6. Calculul rezistenței R'_{2p}

În cazul a două colivii separate, la $s = s_n$, $p_{b2n} = 3R'_{2n} I'^2_{2n}$

condiții în care prin barele coliviei de lucru trece curentul

$$I_{2n}' / (1 + \alpha)$$

Dacă rotorul este turnat în aluminiu, se poate aprecia că curentul I_{2n}' se încheie prin barele coliviei de lucru și o cotă parte :

$$\Delta q_0 \approx q_0 - \frac{q_0}{(1 + \alpha)^2} \quad (4.26)$$

din secțiunea de material din istm.

Admițând această ipoteză rezultă că la pornire curentul I_{2p}' , refulat în partea superioară a crestăturii, trece printr-o secțiune :

$$q_{crp} = q_e + q_0 - \Delta q_0 = q_e + \frac{q_0}{(1 + \alpha)^2} \quad (4.27)$$

Se propune, pe baza celor arătate, ca rezistența R'_{cr2p} (fără inele), să se calculeze cu relația :

$$R'_{cr2p} \approx \frac{k \rho L}{q_{crp}} \quad (4.28)$$

rezultând, pentru rezistența R_{2p}' valoarea :

$$R_{2p}' \approx R'_{cr2p} + R_{1n}' \quad (4.29)$$

Deși relațiile (4.25) și (4.29) nu sînt riguros exacte, se poate aprecia că valorile obținute cu ele vor fi mai apropiate de cele reale decît cele rezultate considerînd coliviile în paralel, întrucît ele sînt deduse pe baza configurației reale a crestăturilor.

4.7. Verificarea valabilității relațiilor propuse pentru
calculul parametrilor rotorici ai rotorului în dublă
colivie turnat în aluminiu.

Relațiile propuse pentru calculul parametrilor X'_{2n} , X'_{2p} , R'_{2n} și R'_{2p} în cazul rotoarelor în dublă colivie turnate în aluminiu au fost verificate la două motoare executate, unul de 15 kW și 750 rpm, iar al doilea de 22 kW și 1000 rpm.

Motoarele respective au fost proiectate pe baza metodei clasice recomandate în literatură pentru mașinile cu rotor în dublă colivie turnat în aluminiu, adică considerând că cele două colivii lucrează în paralel, prezentând o rezistență exterioară, comună ambelor colivii

$$R'_{c2} = R'_{in}$$

respectiv o reactanță exterioară, comună

$$X'_{c2} = X'_{\delta 2} + X'_{d2} + X'_{in}$$

Executate în cadrul unei întreprinderi constructoare de mașini electrice, cele două motoare au fost încercate în gol, în scurtcircuit, în sarcină, efectuându-se și o probă de determinare a cuplului M_p și a curentului I_p la pornire prin conectare directă la sursa de tensiune de alimentare.

Pe baza rezultatelor experimentale și a parametrilor statorici calculați în mod obișnuit, au fost determinate valorile reale ale parametrilor rotorici în regim nominal și de pornire.

Prin compararea lor cu valorile obținute în cadrul proiectării s-a constatat că parametrii R'_{2n} și X'_{2n} calculați sînt comparabili cu cei rezultați din încercări (cu observația că valorile lui X'_{2n} se abate, totuși, cu circa +/- 10% față de valorile rezultate din măsurători), în timp ce parametrii de pornire R'_{2p} și X'_{2p} calculați diferă mult față de cei obținuți experimental.

Calculînd parametrii rotorici cu relațiile stabilite în paragrafele anterioare, valorile rezultate, după cum se va arăta în cele ce urmează, sînt mult mai apropiate de cele experimentale, fiind

vedind că, în cazul motoarelor în dublă colivie turnată în aluminiu sînt mai potrivite decît cele recomandate în literatură, care denaturează în special valorile parametrilor rotorici la pornire.

4.7.1. Datele motoarelor executate și încercate.

a) Motorul de 15 kW și 750 rpm.

A avut ca date de proiectare următoarele :

$$P_n = 15 \text{ kW} , \quad U_{1n} = 500 \text{ V } (\Delta) , \quad f = 50 \text{ Hz} , \quad p = 4 ,$$

$$\eta_n > 0,86 , \quad \cos \varphi_n = 0,67 - 0,68 , \quad m_p = M_p/M_n = 2,8 - 3 ,$$

$$i_p = I_{1p}/I_{1n} = 3,5 - 4 .$$

În urma dimensionării statorului astfel ca solicitările magnetice (inducțiile B în diferite zone) și încărcarea liniară A să se încadreze în limitele admise (dimensiunile principale au fost stabilite avînd în vedere că mărimile de pornire m_p și i_p sînt pretențioase), s-a ajuns la următoarele dimensiuni principale și structură a înfășurării :

$$D_{e_s} = 304,8 \text{ mm} ; \quad D = 208,1 \text{ mm} ; \quad L = 240 \text{ mm} ; \quad Z_s = 72 \text{ crestă-} \\ \text{turi} ; \quad S_{cr_s} = 131 \text{ mm}^2 ; \quad N = 240 \text{ spire} ; \quad y/t = 7/9 ; \quad k_b = 0,902$$

$$\Phi_1 = 1,2 \text{ mm} ; \quad n_c = 20 \text{ cond}/c_r ; \quad n_{el} = 3 ; \quad a = 1$$

Pentru înfășurarea de mai sus rezultă din calcule :

$$R_{175^\circ} = 1,1026 \Omega ; \quad X_1 = 3,1223 \Omega ; \quad X_{m_1} = 65,1223 \Omega ;$$

$$X_{1s} = 2,7534 \Omega .$$

b) Motorul de 22 kW și 1000 rpm.

A avut datele de proiectare următoare :

$$P_n = 22 \text{ kW} ; \quad U_{1n} = 500 \text{ V } (\Delta) ; \quad f_n = 50 \text{ Hz} ; \quad p = 3 ;$$

$$\eta_n > 0,87 ; \quad \cos \varphi_n = 0,77 - 0,78 ; \quad m_p = 2,8 - 3 ;$$

$$i_p = 3,5 - 4 .$$

După determinarea dimensiunilor principale și dimensionarea statorului (în același mod ca la motorul de 15 kW și 750 rpm) au rezultat :

$$D_{e_s} = 304,8 \text{ mm} ; \quad D = 208,1 \text{ mm} ; \quad L = 255 \text{ mm} ; \quad Z_s = 72 \text{ cres-}$$

tături ; $S_{cr_s} = 131 \text{ mm}^2$; $N = 180$ spire ; $y/\tau = 10/12$;

$\phi_1 = 1,2 \text{ mm}$; $n_c = 30 \text{ cond}/c_r$; $n_{e1} = 2$; $a = 2$; $k_b = 0,926$

Pentru înfășurarea statorică, prin calcule, se obțin :

$R_{175^\circ} = 0,6994 \Omega$; $X_1 = 1,792 \Omega$; $X_{m1} = 68,536 \Omega$;

$X_{1s} = 1,57966 \Omega$

Geometria transversală a statorului este, după cum se observă, identică cu aceea a motorului de 15 kW și 750 rpm, urmărindu-se prin aceasta posibilitatea folosirii acelorși SDV-uri pentru realizarea celor două statoare.

4.7.2. Rezultatele încercărilor celor două motoare.

a) Motorul de 15 kW și 750 rpm.

Motorul de 15 kW și 750 rpm a fost supus următoarelor încercări :

- 1) Măsurarea rezistenței statorice la rece ($R_{22^\circ C} = 0,9138 \Omega$)
- 2) Proba de mers în gol
- 3) Proba de scurtcircuit
- 4) Proba de mers în sarcină și separarea pierderilor
- 5) Proba la conectarea directă la rețea.

La toate aceste probe, frecvența tensiunii de alimentare a fost $f = 47 \text{ Hz}$. S-au obținut următoarele rezultate :

La proba de mers în gol :

Nr. crt.	U_1 (V)	I_{10} (med) (A)	P_{10} (W)	$\cos \psi_{10}$	Nr. crt.	U_1 (V)	I_{10} (med) (A)	P_{10} (W)	$\cos \psi_{10}$
1	600	20,3	1625	0,077	7	300	7,06	420	0,114488
2	550	16,4	1250	0,08	8	250	5,96	300	0,116245
3	500	13,43	870	0,0748	9	200	4,65	270	0,167618
4	450	11,55	702	0,07798	10	150	3,48	210	0,232267
5	400	9,79	588	0,08669	11	100	2,58	183	0,409516
6	350	8,45	492	0,096046					

Pe baza acestor rezultate, s-au ridicat caracteristicile $I_{10} = f(U_1)$, $P_{10} = f(U_1)$ și $\cos \psi_{10} = f(U_1)$, care sînt reprezentate în Figura 4.7.

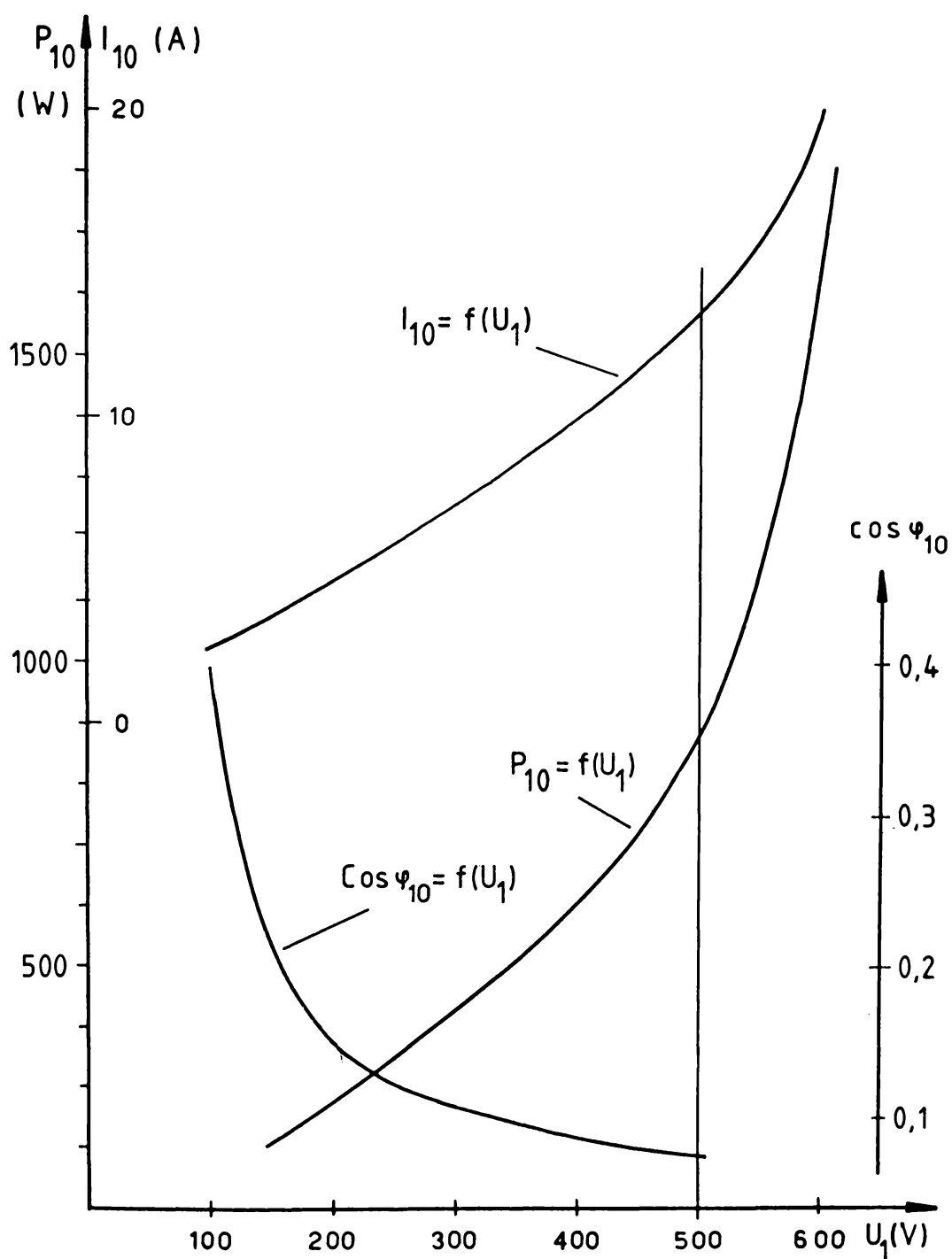


Figura 4.7. Reprezentarea caracteristicilor $I_{10} = f(U_1)$, $P_{10} = f(U_1)$ și $\cos \varphi_{10} = f(U_1)$ ale motorului de 15 kW și 750 rpm.

La proba de scurtcircuit :

Din motive de a nu solicita mașina inadmisibil și având în

vedere rezultatele doar informative ce se pot obține (refularea de curent în rotor fiind mult mai mare la $U_1 = U_{1n}$), la această probă s-a făcut o singură măsurătoare, rezultatele fiind cele din tabelul de mai jos :

Nr. crt.	U_{1s_c} (V)	I_{1s_c} (A)	P_{1s_c} (W)	$\cos \varphi_{1s_c}$
1	100	20,5	2130	0,599881

La proba de mers în sarcină și separarea pierderilor :

S-au obținut următoarele rezultate (la $U_1 = 500$ V, $f_1 = 47$ Hz)

Nr. crt.	P_1 (W)	I_1 (A)	P_{Fe} (W)	P_{mv} (W)	P_{Cu_1} (W)	P_{Cu_2} (W)	P_s (W)	P_t (W)	P_2 (W)	s %	η	$\cos \varphi_1$
1	10640	19,3	544	160	411	248	53	1416	9224	2,56	0,867	0,6366
2	14000	23,2	544	160	593	467	70	1834	12166	3,63	0,869	0,6968
3	17800	28,5	544	160	895	726	89	2354	15446	4,44	0,868	0,7212
4	21240	34,2	544	160	1289	1337	106	3436	17804	6,89	0,838	0,7171

Pentru pierderile p_{Fe} și p_{mv} s-au considerat valorile rezultate pe baza probei de mers în gol.

Caracteristicile $P_1 = f(P_2)$, $I_1 = f(P_2)$, $\eta = f(P_2)$, $\cos \varphi = f(P_2)$, $s = f(P_2)$, unde $\eta = P_2/P_1$ și $\cos \varphi = P_1 / \sqrt{3} U_1 I_1$, sînt reprezentate în Figura 4.8 (a, b)

La proba de conectare a motorului la rețea :

La $U_1 = 365$ V s-au măsurat :

$I_p = 80$ A , $M = L \times G = 1,355 \times 24,7 = 33,468$ kgf·m , unde L este brațul și G este greutatea, adică $M_p = 33,468 \times 9,81 = 328,32$ N·m . În baza acestor rezultate s-au calculat mărimile de pornire la $U_1 = U_{1n} = 500$ V și $f = 50$ Hz :

$$i_p = \frac{I_{p_n}}{I_{1n}} \approx \frac{I_p}{I_{1n}} \cdot \frac{U_{1n}}{U_1} \cdot \frac{f}{f_{1n}} = \frac{80}{27,6} \cdot \frac{500}{365} \cdot \frac{47}{50} = 3,732$$

$$m_p = \frac{M_{p_n}}{M_n} \approx \frac{M_p}{M_n} \left(\frac{U_{1_n}^2}{U_1} \cdot \frac{f_1}{f_{1_n}} \right)^2 = \frac{328,32}{20 \cdot 9,81} \left(\frac{500}{365} \frac{47}{50} \right)^2 = 2,7746$$

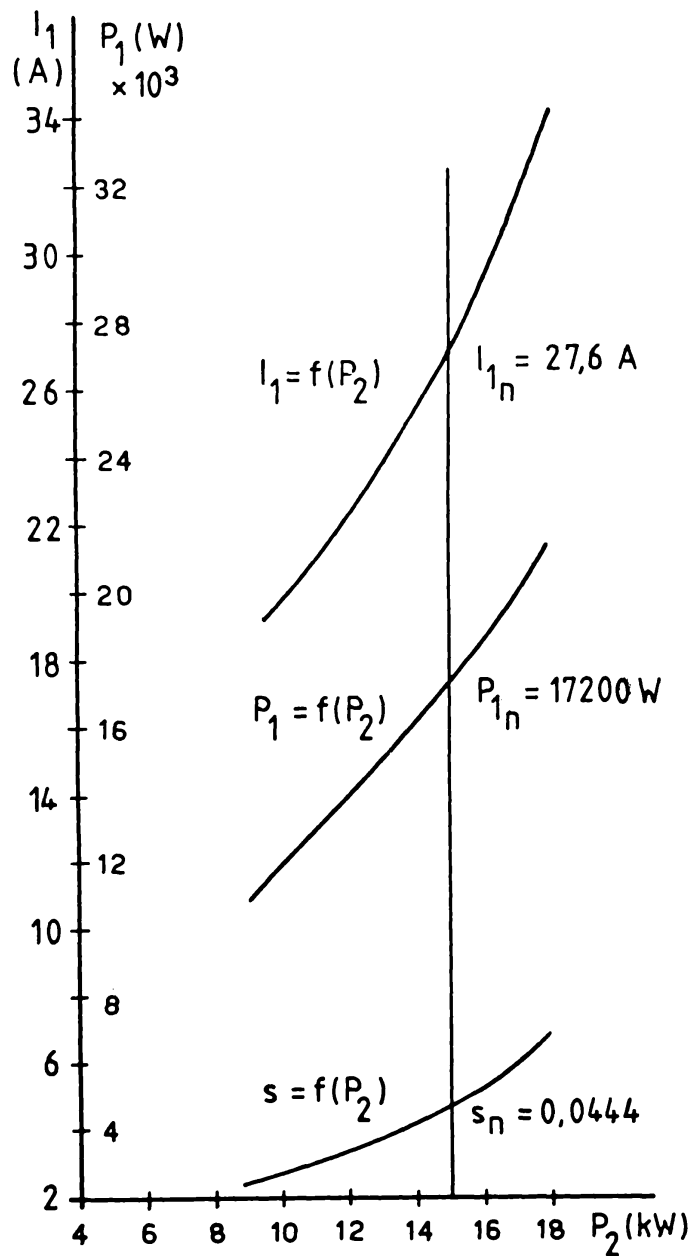


Figura 4.8.a. Reprezentarea caracteristicilor $P_1 = f(P_2)$,
 $I_1 = f(P_2)$, $s = f(P_2)$ ale motorului de 15 kW
și 750 rpm.

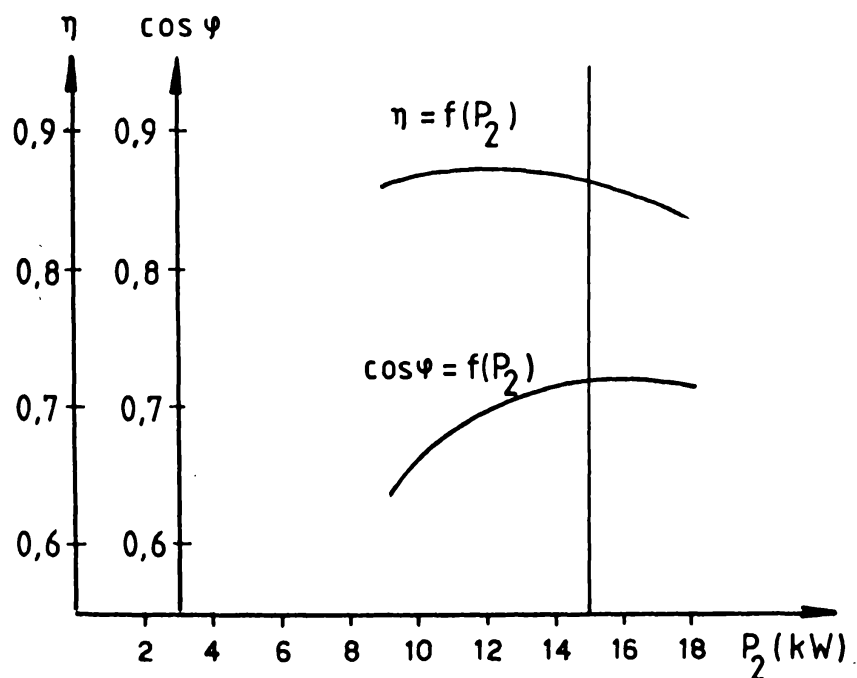


Figura 4.8.b. Reprezentarea caracteristicilor $\eta = f(P_2)$,
 $\cos \varphi = f(P_2)$ ale motorului de 15 kW și 750 rpm

La $U_1 = U_{1n} = 500$ V și $f_1 = 47$ Hz (frecvență la care au avut loc încercările), mărimile de pornire rezultă :

$$I_{p_n}^* \approx I_p \cdot \frac{U_{1n}}{U_1} = 109,589 \text{ A}$$

$$M_p^* \approx M_p \left(\frac{U_{1n}}{U_1} \right)^2 = 328,32 \left(\frac{500}{365} \right)^2 = 616,1 \text{ N}\cdot\text{m}$$

adică $i_p^* = \frac{I_{p_n}^*}{I_{1n}} = \frac{109,589}{27,6} = 3,97$

$$m_p^* = \frac{M_p^*}{M_n} = \frac{616,1}{196,2} = 3,14$$

Din caracteristicile corespunzătoare probei în gol și în sarcină s-au obținut, la $U_1 = 500$ V :

$$P_{1n} = 17,2 \text{ kW} ; \quad \eta_n = 0,8677 ; \quad \cos \varphi_n = 0,72045$$

$$s_n = 0,0444 ; \quad I_{1n} = 27,6 \text{ A} ; \quad P_{10} = 870 \text{ W}$$

$$I_{10} = 13,5 \text{ A} ; \cos \varphi_{10} = 0,074414$$

respectiv, la $U_1^* = 365 \text{ V}$:

$$M_p = 33,468 \text{ kgf}\cdot\text{m} = 328 \text{ N}\cdot\text{m} \text{ și } I_{1p} = 80 \text{ A}$$

b) Motorul de 22 kW și 1000 rpm.

Motorul a fost supus aceluiași încercări ca și motorul precedent și s-au obținut următoarele rezultate :

La proba de mers în gol :

Nr. crt.	U_1 (V)	I_{10} (med) (A)	P_{10} (W)	$\cos \varphi_{10}$
1	600	19,8	1750	0,085
2	550	15,87	1300	0,08599
3	500	13,1	1152	0,10154
4	450	11,32	918	0,104045
5	400	9,72	768	0,114
6	350	8,32	606	0,12
7	300	7,04	528	0,144337
8	250	5,88	420	0,164957
9	200	4,81	342	0,205253
10	150	3,72	270	0,279363
11	100	2,7	201	0,4298

Pe baza acestor rezultate s-au ridicat caracteristicile $I_{10} = f(U_1)$, $P_{10} = f(U_1)$ și $\cos \varphi_{10} = f(U_1)$, care sînt reprezentate în Figura 4.9.

La proba în scurtcircuit :

Din motivul de a nu solicita mașina inutil și avînd în vedere rezultatele doar informative care se pot obține (refularea de curent în rotor fiind mult mai mare la $U_1 = U_{1n}$), la această probă s-a făcut o singură măsurătoare. Rezultatele obținute au fost :

Nr. crt.	U_{1sc} (V)	I_{1sc} (A)	P_{1sc} (W)	$\cos \varphi_{1sc}$
1	100	31,5	3300	0,6048

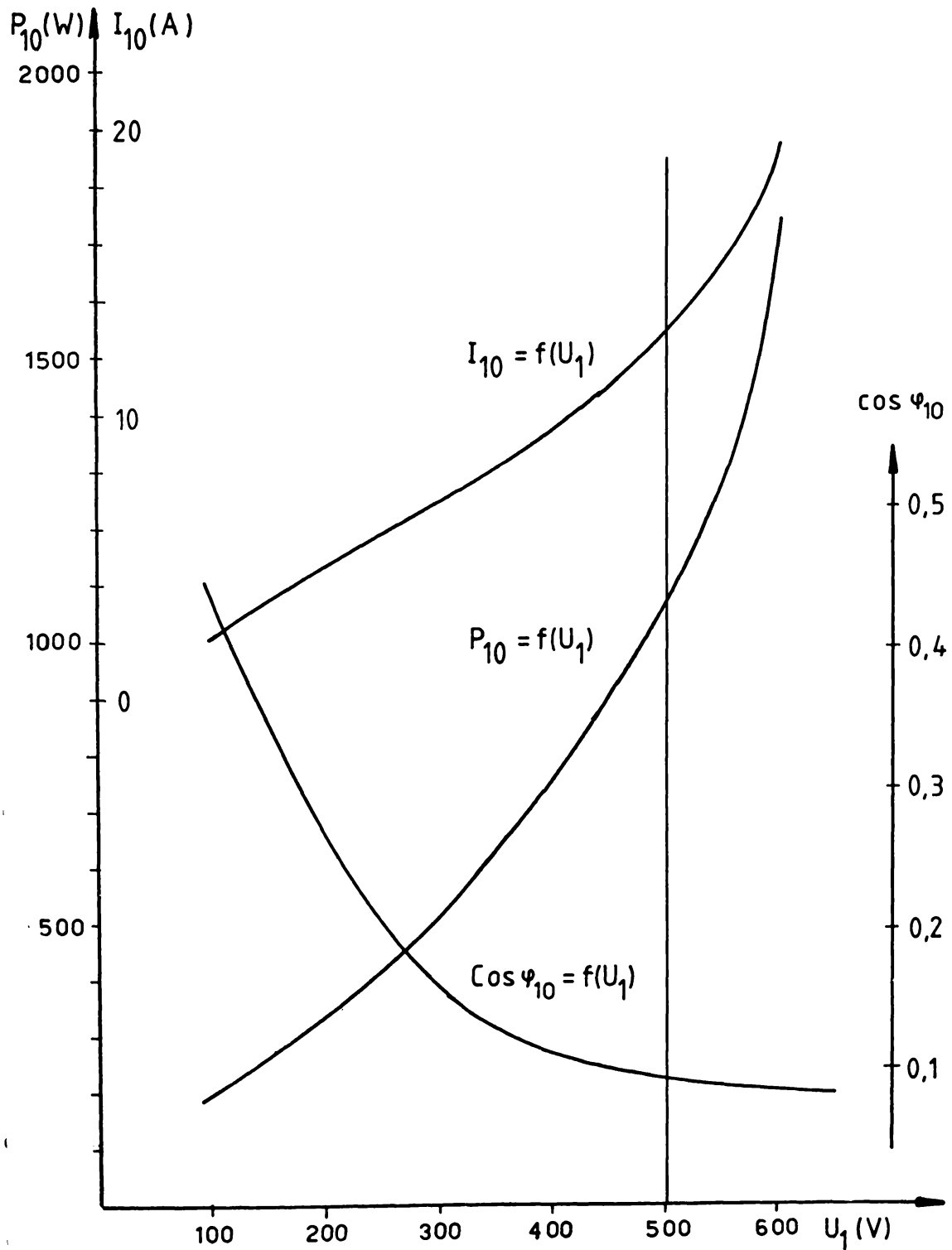


Figura 4.9. Reprezentarea caracteristicilor $I_{10} = f(U_1)$, $P_{10} = f(U_1)$ și $\cos \varphi_{10} = f(U_1)$ la motorul de 22 kW și 1000 rpm.

La proba de mers în sarcină și separarea pierderilor :

S-au obținut următoarele rezultate (la $U_1 = 500$ V, $f_1 = 47$ Hz)

Nr. crt.	P_1 (W)	I_1 (A)	p_{Fe} (W)	p_{mv} (W)	p_{Cu_1} (W)	p_{Cu_2} (W)	p_s (W)	p_t (W)	P_2 (W)	s %	η	$\cos \varphi$
1	18600	28,5	890	160	568	456	93	2167	16433	2,66	0,883	0,7536
2	21260	32,5	890	160	739	654	106	2549	18711	3,33	0,880	0,75535
3	24900	38,9	890	160	1062	1019	124	3255	21645	4,44	0,869	0,738
4	27900	44,1	890	160	1362	1423	139	3974	23926	5,55	0,857	0,73

Pentru pierderile p_{Fe} și p_{mv} s-au considerat valorile rezultate din proba de mers în gol.

Caracteristicile $P_1 = f(P_2)$, $I_1 = f(P_2)$, $\eta = f(P_2)$, $\cos \varphi = f(P_2)$ și $s = f(P_2)$, unde $\eta = P_2/P_1$ și $\cos \varphi = P_1/\sqrt{3} U_1 I_1$ sînt reprezentate în Figura 4.10 (a, b).

La proba de conectare a motorului la rețea :

Proba s-a executat la $U_1 = 365$ V și $f = 47$ Hz, cînd s-au măsurat :

$$I_p = 122,4 \text{ A} ; M = L \times G = 1,755 \times 30,3 = 53,1765 \text{ kgf}\cdot\text{m}$$

edică :

$$M_p = 53,1765 \times 9,81 = 521,66 \text{ N}\cdot\text{m}$$

În baza acestor rezultate s-au calculat mărimile de pornire la $U_1 = U_{1n} = 500$ V și raportate la frecvența $f_{1n} = 50$ Hz :

$$i_p = \frac{I_{pn}}{I_{1n}} \approx \frac{I_p}{I_{1n}} \cdot \frac{U_{1n}}{U_1} \cdot \frac{f}{f_{1n}} = \frac{122,4}{39,6} \cdot \frac{500}{365} \cdot \frac{47}{50} = 3,98$$

$$m_p = \frac{M_{pn}}{M_n} \approx \frac{M_p}{M_n} \left(\frac{U_{1n} f_{1n}}{U_1 f_1} \right)^2 = \frac{521,66}{22 \cdot 9,81} \left(\frac{500 \cdot 47}{365 \cdot 50} \right)^2 = 3,1244$$

La $U_1 = U_{1n} = 500$ V și $f_1 = 47$ Hz (la care s-au făcut încercările), mărimile de pornire rezultă :

$$I_{pn}^* \approx I_p \frac{U_{1n}}{U_1} = 122,4 \frac{500}{365} = 167,67 \text{ A}$$

$$R_{2N}^1 = K_{2N} \cdot K_e^2 = 0,164 \cdot 1,58^2 = 0,407 \Omega$$

$$X = X_1 + X_2^1 = 4,63 + 0,67 \cdot 1,58^2 = 2,12 \Omega$$

$$\frac{I_{2N}^1}{I_{2N}} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 22,2 \sqrt{\left(0,354 + \frac{0,407}{0,074}\right)^2 + 2,12^2}} = 1,6$$

2.15. Rata proprie geometrice

$$f = \frac{S_1}{S_0} = \frac{0,074}{0,030} = 1,9$$

2.16. Alunecările corespunzătoare caracteristicilor artificiale

$$S_2 = S_1 f = 0,074 \cdot 1,9 = 0,141$$

$$S_3 = 0,269$$

$$S_4 = 0,513$$

2.17. Rezistența rotorică nominală

$$R_{2N} = \frac{U_{2N} \cdot s_N}{\sqrt{3} I_{2N}} = \frac{220 \cdot 0,045}{\sqrt{3} \cdot 35} = 0,164 \Omega$$

2.18. Rezistențele rotorice pentru diferite caracteristici mecanice

$$R_x = R_{2N} (f^x - 1)$$

$$R_I = 0,164 (1,9 - 1) = 0,15 \Omega$$

$$R_{II} = 0,164 \cdot 2,6 = 0,428 \Omega$$

$$R_{III} = 0,97 \Omega$$

$$R_{IV} = 2 \Omega$$

$$R_V = R_{2N} \left(\frac{S_{K5} - 1}{S_K} \right) = 0,164 \left(\frac{6,16}{2,262} - 1 \right) = 3,44$$

Verificarea vitezei reale de ridicare a sarcinii nominale

2.20. Alunecarea corespunzătoare sarcinii nominale pe caracteristica inițială

$$s_{s1} = \frac{2}{\frac{S_{s1}}{S_N}} = \frac{3}{0,179} = 3,8$$

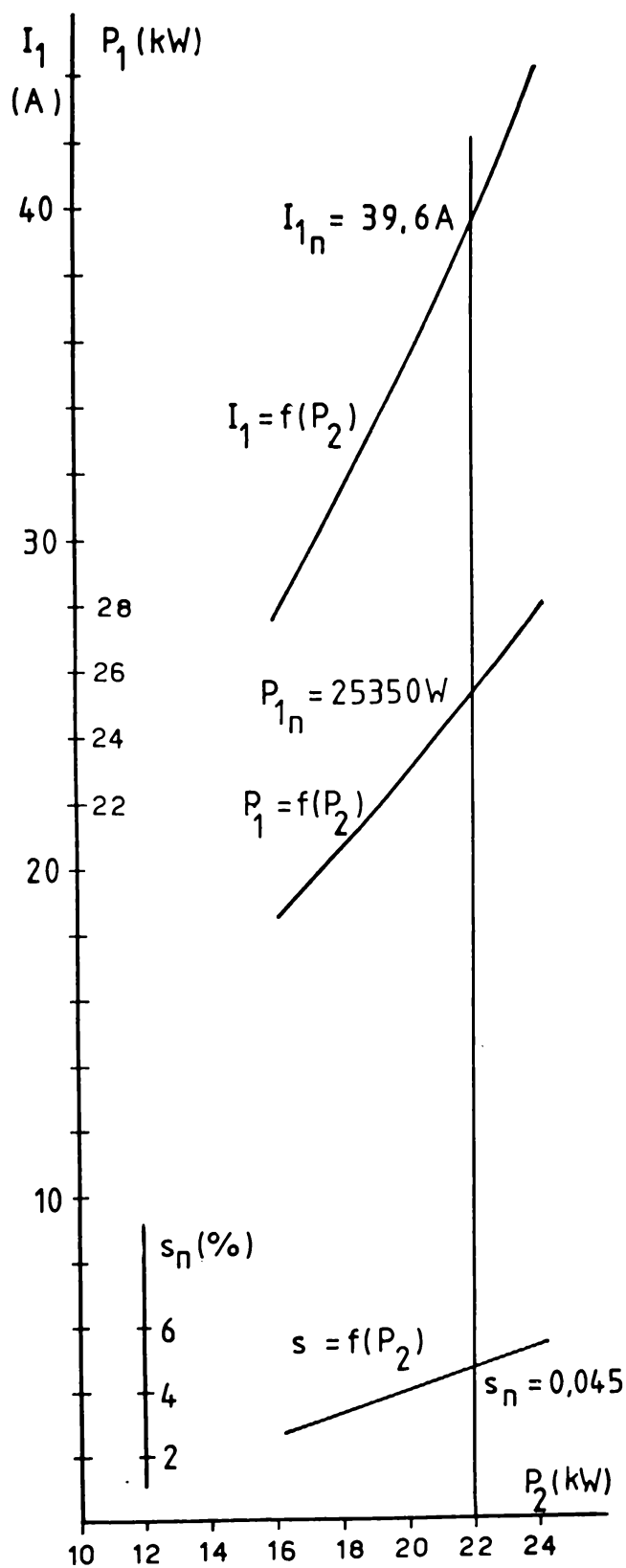


Figura 4.10.a. Reprezentarea caracteristicilor $P_1 = f(P_2)$, $I_1 = f(P_2)$ și $s = f(P_2)$ la motorul de 22 kW și 1000 rpm.

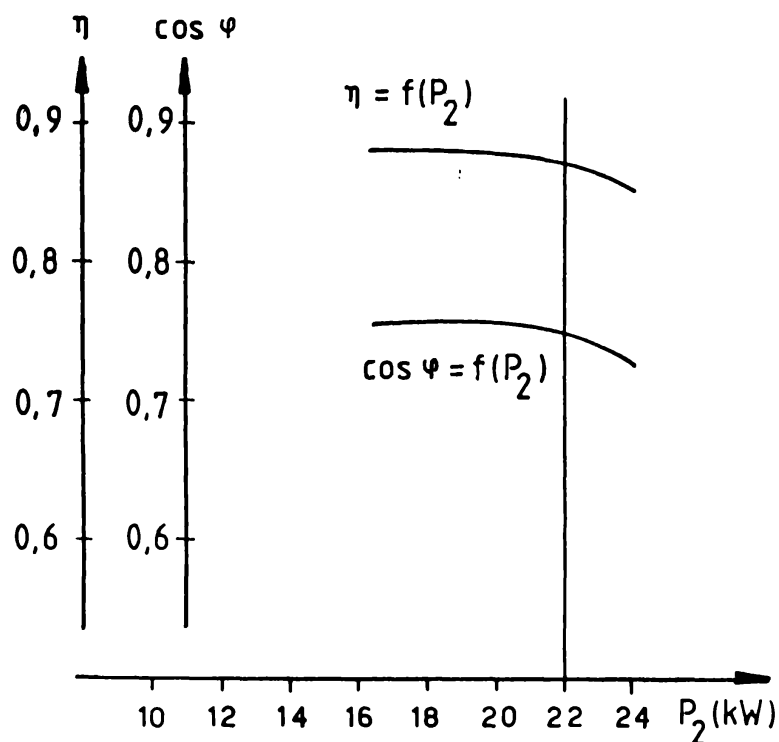


Figura 4.10.b. Reprezentarea caracteristicilor $\eta = f(P_2)$ și $\cos \varphi = f(P_2)$ la motorul de 22 kW și 1000 rpm.

$$M_p^* = M_p \left(\frac{U_{1n}}{U_1} \right)^2 = 521,66 \left(\frac{500}{365} \right)^2 = 978,91 \text{ N}\cdot\text{m}$$

adică :

$$i_p^* = \frac{I_{pn}^*}{I_{1n}} = \frac{167,67}{39,6} = 4,234$$

$$m_p^* = \frac{M_p^*}{M_n} = \frac{978,91}{215,82} = 4,536$$

Din caracteristicile corespunzătoare probei în gol și în sarcină s-au obținut, la $U_1 = 500 \text{ V}$:

$$P_{1n} = 25,35 \text{ kW} ; \eta_n = 0,86785 ; \cos \varphi_n = 0,74 ; s_n = 0,045$$

$$I_{1n} = 39,6 \text{ A} ; P_{10} = 1090 \text{ W} ; I_{10} = 13,1 \text{ A} ; \cos \varphi_{10} = 0,01014$$

respectiv, la $U_1 = 370 \text{ V}$:

$$M_p = 402,764 \text{ N}\cdot\text{m} \text{ și } I_{1p} = 122,4 \text{ A} .$$

Se menționează că la frecvența standard $f = 50 \text{ Hz}$, M_p și curentul I_{1p} ar fi rezultat de valori întrucîtva diferite ; mărimile de pornire relative în acest caz, după cum s-a arătat și anterior, rezultau :

$$m_p(15 \text{ kW}) = 2,7746 \text{ și } i_p(15 \text{ kW}) = 3,732$$

$$m_p(22 \text{ kW}) = 3,01 \text{ și } i_p(22 \text{ kW}) = 3,926$$

Comparînd rezultatele experimentale cu cele impuse (chiar dacă frecvența disponibilă a fost doar de 47 Hz în loc de 50 Hz), se observă că, în limitele abaterilor admise de STAS, cele două motoare corespund, sub aspectul comportării lor, datelor impuse. În schimb, unele mărimi (de exemplu : I_1 , P_{10} , I_{10} , și chiar și η_n , $\cos \varphi_n$) diferă de cele rezultate în urma calculului de proiectare pe baza recomandărilor din literatură, sugerînd că valorile parametrilor rotorici reali diferă de cele calculate.

Pentru a vedea cum stau lucrurile, datele obținute prin încercări au fost prelucrate, în scopul stabilirii parametrilor rotorici reali.

4.7.3. Determinarea, pe baza rezultatelor de la încercări, a parametrilor rotorici reali.

Parametrii rotorici nominali, împreună cu cei statorici, determină "parametrii echivalenți" nominali ai motorului :

$$R_n = R_1 + C_1 \frac{R_2'^2}{s_n} \quad (4.30)$$

$$X_n = X_1 + C_1 X_2'^2 \quad (4.31)$$

$$Z_n = \sqrt{R_n^2 + X_n^2} \quad (4.32)$$

Pentru stabilirea valorilor acestor parametri, și prin aceste

a parametrilor R'_{2n} , X'_{2n} este necesară cunoașterea valorii curentului I'_{2n} și a componentelor sale, activă și reactivă.

În acest scop, s-a folosit triunghiul curenților I_{1n} , I_{10} și $-I'_{2n}$ din planul complex (Figura 4.11) în care aplicând teorema sinusului s-a obținut :

$$I'_{2n} = \sqrt{I_{1n}^2 + I_{10}^2 - 2 I_{1n} I_{10} \cos \alpha} \quad (4.33)$$

unde I_{1n} și I_{10} sînt exprimați ca mărimi de fază, iar

$$\alpha = \varphi_{10} - \varphi_{1n}$$

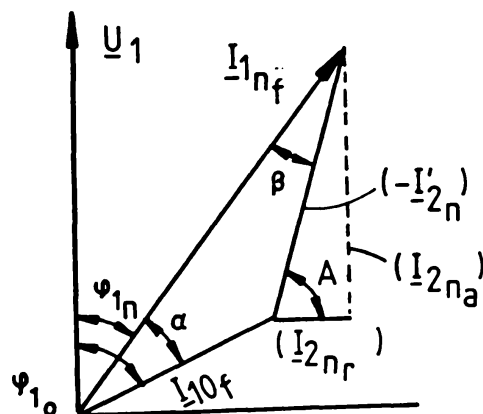


Figura 4.11. Reprezentarea diagramei fazoriale a curenților unei mașini asincrone.

Pentru a determina valorile parametrilor R_n , X_n și Z_n este necesară cunoașterea valorilor lui I'_{2na} și I'_{2nr} .

În acest sens, s-au determinat unghiurile :

$$\beta = \arcsin\left(\frac{I_{10}}{I_{1n}} \sin \alpha\right) \quad (4.34)$$

$$\gamma = 180 - \alpha - \beta \quad (4.35)$$

și respectiv unghiul :

$$A = 180 - [\gamma - (90 - \varphi_{10})] = 270 - \gamma - \varphi_{10} \quad (4.36)$$

Cunoscând unghiul A s-au calculat succesiv :

$$\left. \begin{aligned} I'_{2_{n_a}} &= I'_{2_n} \sin A \\ I'_{2_{n_r}} &= I'_{2_n} \cos A \end{aligned} \right\} \quad (4.37)$$

$$Z_n = U_1 / I'_{2_n} \quad (4.38)$$

$$\left. \begin{aligned} R_n &= Z_n^2 I'_{2_{n_a}} / U_1 \\ X_n &= Z_n^2 I'_{2_{n_r}} / U_1 \end{aligned} \right\} \quad (4.39)$$

Avînd astfel determinate valorile lui R_n și X_n , s-au calculat valorile parametrilor :

$$R'_{2_n} = \frac{R_n - R_1}{C_1} s_n \quad (4.40)$$

$$X'_{2_n} = \frac{X_n - X_1}{C_1} \quad (4.41)$$

(prin C_1 s-a notat mărimea $C_1 = 1 + X_1/X_m$), care rezultă în baza mărimilor determinate experimental.

Pentru a stabili parametrii rotorici de pornire ai celor două motoare încercate, m-am folosit de valorile determinate experimental la $U_1 = U_1^*$ ale cuplului M_p și curentului I_{1p} .

Este cunoscută relația cuplului de pornire :

$$M_p = \frac{3R_p I_{2p}^2}{\Omega_1} \quad (4.42)$$

Dacă se cunosc M_p și I_{2p} , rezistența la pornire R'_{2p} este :

$$R'_{2p} = \frac{\Omega_1 M_p}{3I_{2p}'^2} \quad (4.43)$$

Avînd în vedere că la pornire defazajul ψ_{1p} între U_1 și I_{1p} este mare, comparabil cu ψ_{10} , am admis că

$$I_{2p}' \cong I_{1p} - I_{10} \quad (4.44)$$

(toți curenții exprimați ca și curenți de fază), condiții în care, cu relația (4.43) am calculat valoarea R'_{2p} a rezistenței de pornire a motorului analizat.

Reactanța X'_{2p} este :

$$X'_{2p} = \frac{X_p - X_{1s}}{C_{1s}} \quad (4.45)$$

în care C_{1s} și X_{1s} (mărimi cunoscute în cazul statorului dat) sînt "valorile saturate" ale mărimilor respective.

Reactanța echivalentă a mașinii la pornire X_p este evident

$$X_p = \sqrt{Z_p^2 - R_p^2} \quad (4.46)$$

unde

$$Z_p = U_1 / I_{2p}' \quad (4.47)$$

iar

$$R_p = R_1 + C_{1s} R'_{2p} \quad (4.48)$$

Efectuînd calculele conform celor de mai sus - relațiile (4.40), (4.41), (4.43) și (4.44) - s-au obținut, pentru cele două motoare încercate, valorile de parametri cuprinse în Tabelul T 4.1.

Tabelul T 4.1

Motorul încercat	$R'_{2n} (\Omega)$	$X'_{2n} (\Omega)$	$R'_{2p} (\Omega)$	$X'_{2p} (\Omega)$
15/750	1,6819	12,32	5,4138	3,6833
22/1000	1,0673	10,2634	3,3210	2,5538

4.7.4. Parametrii rotorici calculați prin metoda clasică.

Ambele motoare proiectate și încercate au creștătura rotorică de forma celei reprezentate în Figura 4.1, cu unele diferențe privind valorile unor dimensiuni.

Valorile diferitelor dimensiuni, în cazul fiecărui motor, sînt date în Tabelul T 4.2 (în mm).

Tabelul T 4.2.

Motorul	b_{4r}	h_{4r}	d_a	b_o	h_o	d_1	d_2	h_i
15/750	2,2	1,2	4,2	1	11,6	3,6	2	17,3
22/1000	2,2	1,2	4,2	1	16,4	3,8	2	19,3

Executînd calculele de determinare a rezistențelor și reactanțelor celor două colivii propriuzise, a rezistenței și reactanței comune, exterioare creștăturilor și a reactanței de dispersie mutuală X' după relațiile recomandate în literatură, considerînd frecvența de încercare $f = 47$ Hz au rezultat valorile din Tabelul T 4.3 (în Ω).

Tabelul T 4.3

Motorul	R'_e	R'_i	$R'_{i_n} = R'_{c_2}$
15/750	7,8933	1,9847	0,0428
22/1000	4,9718	1,0892	0,06117

Motorul	x'_e	X'_i	X'_{c_2}	X'
15/750	0,6157	14,5904	2,0147	0,7323
22/1000	0,3878	12,1052	1,3151	0,4613

Folosind relațiile (1.25) și (1.26), cînd $s = s_n$, respectiv relațiile (1.27) și (1.28) pentru cazul $s = 1$, s-au obținut valorile înscrise în Tabelul T 4.4.

Tabelul T 4.4.

Motorul	R'_{2n}	X'_{2n}	R'_{2p}	X'_{2p}
15/750	1,6287	13,68	5,876	6
22/1000	0,955	9,615	4,2046	3,168

Se menționează că X'_{2p} s-a calculat ținând seama de influența saturației (care se manifestă asupra valorii lui X'_{c2}), neglijându-se influența refulării curentului în barele de lucru, de înălțime sub 2 cm.

Se observă că utilizând relațiile din literatură, parametrii rotorici de pornire R'_{2p} și X'_{2p} rezultă relativ mult mai mari (a se vedea Tabelul T 4.1) decât cei reali, pentru ambele motoare. Dintre parametrii nominali, R'_{2n} rezultă practic egali cu cei stabiliți experimental, pentru reactanța X'_{2n} rezultând însă abateri de ordinul +/- (8 - 12)%.

4.7.5. Parametrii rotorici calculați prin metoda de echivalență propusă în prezenta lucrare.

Parametrii rotorici ai celor două motoare încercate au fost calculați, în continuare, folosind metoda propusă, pentru frecvență luându-se în considerare valoarea existentă la încercări ($f = 47$ Hz), iar pentru rezistivitatea ρ_{Al} valoarea corespunzătoare temperaturii de lucru a mașinilor, la care $R'_{2n} = R'_{2exp}$.

a) Calculul reactanței X'_{2n} .

Am calculat pentru început permeanța specifică λ_{cr2} , cu relația (4.8), apoi permeanța specifică λ_{c0} (relația 4.10) și permeanța specifică λ_{cr2} (relația 4.11).

Cu valoarea λ_{cr2} obținută am determinat - relația (4.13) - reactanța X'_{cr2} și cu relația (4.14) reactanța X'_{2n} .

In cazul motorului de 15 kW și 750 rpm :

Au rezultat succesiv :

$$\lambda_{cr_T} = \frac{h}{3b_o} (1 + uv^3 - u^3v^3) = 10,844$$

în care :

$$h = \frac{b_i h_i + b_o h_o}{b_o} = \frac{2,8 \cdot 17,3 + 1 \cdot 11,6}{1} = 60,04 \text{ mm}$$

$$u = \frac{b_i}{b_o} = \frac{d_1 + d_2}{2b_o} = \frac{5,6}{2 \cdot 1} = 2,8$$

$$v = \frac{h_i}{h} = \frac{17,3}{60,04} = 0,28814 ;$$

$$\lambda_{c_o} = \frac{4}{\pi} (0,75 - 0,5 \ln \frac{b_{4r}}{d_e}) = 1,3666 ;$$

$$\lambda_{cr_2} = \lambda_{c_T} + \lambda_{c_o} = 12,2105$$

$$X'_{cr_2} = k \cdot 2\pi f \mu_o L \lambda_{cr_2} = 9459,4 \cdot 2\pi \cdot 47 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,24 \cdot 12,2105$$

$$X'_{cr_2} = 10,237 \Omega \text{ și } X'_{2_n} = 1,7 + 10,237 = 11,937 \approx 12 \Omega$$

În cazul motorului de 22 kW și 1000 rpm :

S-au obținut :

$$\lambda_{cr_T} = \frac{72,399}{3 \cdot 1} (1 + 2,9 \cdot 0,2667^3 - 2,9^3 \cdot 0,2667^3) = 14,295$$

$$\lambda_{c_o} = 1,3666 ; \lambda_{cr_2} = 15,662$$

$$X'_{cr_2} = 6209,8 \cdot 2\pi \cdot 47 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,255 \cdot 15,662 = 9,2035 \Omega$$

$$X'_{2_n} = 0,9977 + 9,2035 = 10,2 \Omega$$

b) Calculul reactanței X'_{2_p}

Ca și în cazul reactanței X'_{2_n} , am aplicat rezultatele din

§4.4 pentru cele două motoare încercate.

Corespunzător echivalării creștăturii din punct de vedere al dispersiei cu una de forma din Figura 4.5, am stabilit întâi, cu relația (4.16), înălțimea echivalentă h_{cr} , după care am calculat factorul α_p cu relația (4.18). Determinînd factorul de micșorare a reactanței la pornire - relația (4.19) - am putut calcula reactanțele $X'_{cr_{2p}}$ și în final X'_{2p} - relațiile (4.20) și (4.21).

Am aplicat metoda descrisă celor două motoare considerate anterior.

In cazul motorului de 15 kW și 750 rpm :

Am obținut succesiv :

$$h_{cr} = 3b_i \cdot \lambda_{cr_2} = 3 \cdot 2,8 \cdot 12,2105 = 102,57 \text{ mm}$$

$$\alpha_p = \sqrt{\frac{\pi f_1 \mu_0}{\rho}} \approx \sqrt{\frac{\pi \cdot 47,4 \pi \cdot 10^{-7}}{0,0435 \cdot 10^{-6}}} = 65,317 \text{ 1/m}$$

$$\xi = \alpha_p \cdot h_{cr} = 65,317 \cdot 102,57 = 6,7$$

$$k_x = \frac{3}{2 \cdot \xi} = \frac{3}{2 \cdot 6,7} = 0,2239$$

$$X'_{cr_{2p}} = k_x X'_{cr_2} = 0,2239 \cdot 10,287 = 2,3032 \Omega$$

Din calcule, pentru $X'_{c_{2s}}$ a rezultat valoarea :

$$X'_{c_{2s}} = 1,2856 \Omega$$

și deci :

$$X'_{2p} = X'_{c_{2s}} + X'_{cr_{2p}} = 3,5888 \Omega$$

In cazul motorului de 22 kW și 1000 rpm :

Calcululele au dus la următoarele rezultate :

$$h_{cr} = 3b_i \lambda_{cr_2} = 3 \cdot 2,9 \cdot 15,662 = 136,2594 \text{ mm}$$

$$\xi = \alpha_p \cdot h_e = 65,317 \cdot 0,13626 = 8,9$$

$$k_x = \frac{3}{2 \cdot \xi} = \frac{3}{17,8} = 0,16854$$

$$X'_{cr_{2p}} = k_x X'_{cr_2} = 0,16854 \cdot 9,2035 = 1,5511 \Omega$$

Avînd în vedere că la acest motor, după efectuarea calculelor respective, a rezultat :

$$X'_{c_{2s}} = 0,9579 \Omega$$

reactanța la pornire are valoarea :

$$X'_{2p} = X'_{c_{2s}} + X'_{cr_{2p}} = 0,9579 + 1,5511 = 2,509 \Omega$$

c) Calculul rezistenței R'_{2n} .

Aplicînd relațiile (4.24) și (4.25), considerînd rezistivitatea corespunzătoare rezistenței R'_{2n} obținută prin încercări, au rezultat :

In cazul motorului de 15 kW și 750 rpm :

$$R'_{2n} = 1,68 \Omega$$

In cazul motorului de 22 kW și 1000 rpm :

$$R'_{2n} = 1,07 \Omega$$

d) Calculul rezistenței R'_{2p} .

Am folosit în acest scop relațiile (4.27), (4.28) și (4.29).

S-au obținut :

In cazul motorului de 15 kW și 750 rpm :

$$q_{cr_p} = q_e + \frac{q_o}{(1 + \alpha)^2} = 13,8544 + \frac{b_o h_o}{(1 + \alpha)^2} =$$

$$= 13,8544 + \frac{1 \cdot 11,6}{\left(1 + \frac{1,9347}{7,8333}\right)^2} = 21,2336 \text{ mm}^2$$

$$R'_{cr_{2p}} = \frac{k \rho L}{q_{cr_p}} = \frac{1,0621 \cdot 10^4 \cdot 0,044922 \cdot 0,24}{21,2336} = 5,3915 \Omega$$

Cum :

$$R'_{i_{n_2}} = 0,0623 \Omega, \text{ rezultă}$$

$$R'_{2p} = R'_{cr_{2p}} + R'_{i_{n_2}} = 5,3915 + 0,0623 = 5,4538 \Omega$$

In cazul motorului de 22 kW și 1000 rpm :

$$q_{cr_p} = 13,8544 + \frac{1 \cdot 16,4}{\left(1 + \frac{1,0892}{4,9718}\right)^2} = 24,89 \text{ mm}^2$$

$$R'_{cr_{2p}} = \frac{0,62098 \cdot 10^4 \cdot 0,0486 \cdot 0,255}{24,89} = 3,0919 \Omega$$

$$\text{Cum } R'_{i_{n_2}} = 0,08938 \Omega, \text{ în final}$$

$$R'_{2p} = R'_{cr_{2p}} + R'_{i_{n_2}} = 3,0919 + 0,08938 = 3,1813 \Omega$$

4.7.6. Concluzii.

In Tabelul T 4.5 sînt înscrise rezultatele obținute privind parametrii rotorici, din încercări, prin metoda clasică și prin metoda propusă.

Din Tabelul T 4.5 se observă că rezultatele calculate cu metoda propusă sînt foarte apropiate de cele obținute la încercări.

La motorul de 15/750 rezistența nominală R'_{2n} și rezistența de pornire R'_{2p} sînt practic egale cu cele determinate la încercări, iar reactanța nominală X'_{2n} și reactanța de pornire X'_{2p} diferă cam cu (-2%).

La calculul cu metoda clasică, reactanța nominală X'_{2n} diferă

mult mai mult de valoarea rezultată în urma încercărilor, iar la rezistența de pornire R'_{2p} intervine o diferență de aproximativ (+8%) ; reactanța rotorică X'_{2p} , rezultată pe baza calculelor cu metoda propusă în literatură, cum se observă, rezultă mult superioară celei reale.

Tabelul T 4.5.

Motor 15/750	R'_{2n}	X'_{2n}	R'_{2p}	X'_{2p}
Din încercări	1,6819	12,32	5,4138	3,6883
Calculați cu metoda clasică	1,6287	13,68	5,876	6
Calculați cu metoda propusă	1,68	12	5,4538	3,5888

Motor 22/1000	R'_{2n}	X'_{2n}	R'_{2p}	X'_{2p}
Din încercări	1,0673	10,2634	3,3210	2,5538
Calculați cu metoda clasică	0,955	9,615	4,2046	3,163
Calculați cu metoda propusă	1,07	10,2	3,1812	2,509

La motorul de 22/1000 situația este calitativ asemănătoare : rezistențele R'_{2n} și R'_{2p} calculate cu metoda propusă verifică valorile obținute la încercări (R'_{2p} se abate doar cu -4,3%), ca și reactanțele X'_{2n} și X'_{2p} ; prin metoda clasică abaterile sînt substanțiale în ceea ce privește reactanțele : X'_{2n} cu -6,75% , X'_{2p} cu +24% , dar și rezistența R'_{2p} rezultă relativ mult peste valoarea experimentală (cu +26,6%).

Din cele de mai sus, rezultă că metoda propusă dă valori mult mai realiste decît metoda clasică și, ca urmare, la motoarele în dublă colivie turnate în aluminiu, această metodă este aceea care trebuie luată în considerație.

CAPITOLUL V.METODICA DE PROIECTARE A MOTOARELOR DE INDUCȚIE
IN DUBLA COLIVIE TURNATE IN ALUMINIU.5.1. Considerații generale.

Motoarele de inducție în dublă colivie turnate în aluminiu, după cum s-a arătat, trebuie considerate drept motoare cu o singură colivie formată din bare de o formă particulară.

În această situație, parametrii nominali și de pornire trebuie calculați cu relații diferite de cele folosite în cadrul metodei clasice de proiectare a motoarelor în dublă colivie și în acest sens propun utilizarea rezultatelor obținute în Capitolul IV.

Pe lângă dimensionarea creștăturilor rotorice având istmul ocupat de aluminiu, respectiv a statorului, astfel ca parametrii mașinii să asigure mărimile de pornire și cele energetice impuse, intervine, în plus, și problema proiectării motorului astfel ca procesul de pornire să fie continuu, adică motorul să se caracterizeze printr-o caracteristică a cuplului potrivită (cuplul $M_{p_{min}}$ care intervine din cauza prezenței, în general, a unei "gei" a acestei caracteristici - să rămână mai mare decât M_n).

Îmi propun ca în acest capitol să sistematizez metoda de proiectare a motorului de inducție în dublă colivie turnat în aluminiu, care să asigure în final satisfacerea cerințelor subliniate mai sus.

Problematika va fi dezvoltată, conform obiectivului urmărit în teză, pentru cazul motoarelor în dublă colivie turnate în aluminiu cu mărimi de pornire pretentioase.

Prin particularizări privind unele mărimi care se adoptă (de exemplu, factorul α), metoda poate fi întrebuintată și pentru o proiectare mai corectă a motoarelor în dublă colivie turnate în aluminiu cu mărimi de pornire obișnuite, caracteristice motoarelor de serie.

5.2. Stabilirea dimensiunilor principale și dimensionarea statorului.

Stabilirea dimensiunilor principale : diametrul interior al statorului D și lungimea $L = L_i$ (ideală), urmează a se face în concordanță cu rezultatele obținute în Capitolul III.

Admițând că mărimile de pornire impuse sînt rezonabile, la limita efectiv necesară ($m_p \leq 3$, $i_p > 3,5 - 4$) și adoptînd preliminar o valoare a alunecării s_n sporită, cu 30 - 50%, față de alunecarea s_n^* a motorului de serie corespondent, se determină factorul de lungire a mașinii - a se vedea relația (3.30).

$$\gamma = \left(\frac{s_n}{s_n^*} \cdot \frac{k_{b2}}{k_{b2}^*} \cdot \frac{j_2^*}{j_2} \right)^2 \quad (5.1)$$

în care se poate considera $k_{b2} = k_{b2}^*$ (barelor rotorice li se dă aceeași înclinare), iar densitatea de curent j_2 se alege spre limita admisibilă.

Dacă j_2^* nu este cunoscut, se admite ipoteza că și această densitate de curent s-a adoptat spre limita admisibilă, astfel că $j_2^*/j_2 \cong 1$.

Pentru stabilirea dimensiunilor principale :

a) Se adoptă o valoare preliminară a factorului $\lambda^* = L^*/\tau^*$, pentru motorul corespondent de serie, conform recomandărilor din literatură.

b) Se determină, cu ajutorul relației (3.18), valoarea factorului :

$$\lambda = \gamma^{1,5} \lambda^* \quad (5.2)$$

c) Se calculează puterea aparentă electromagnetică :

$$S_{i_n} = \frac{P_n}{\eta_n \cos \varphi_n} \quad (5.3)$$

unde pentru η_n și $\cos \varphi_n$ sînt valabile relațiile (3.45) și (3.59).

d) Adoptînd constanta mașinii C , se calculează valorile, într-o primă aproximație, pentru diametrul :

$$D = \sqrt[3]{\frac{2p}{\pi \lambda} \cdot \frac{60 \cdot S_{i_n}}{n_1 C}} \quad (5.4)$$

(S_{i_n} exprimat în VA , n_1 în rot/min , C în J/dm³), acesta rezultând în a_m , și lungimea

$$L = \lambda \frac{\pi D}{2p} \quad (5.5)$$

În corespondență cu studiul efectuat în Capitolul III vor rezulta $D < D^*$ și $L > L^*$. Valorile definitive ale lui D și L trebuie să satisfacă condițiile :

a) lui D să-i corespundă un diametru exterior al statorului D_e standardizat (care se poate determina, după cum s-a demonstrat, ca la motoarele de uz general) ;

b) Lungimea L să nu fie exagerat de mare față de lungimea L^* a motorului de serie corespondent ($L \leq (1,2 - 1,22)L^*$).

Dacă ultima condiție nu este îndeplinită, se modifică valoarea adoptată pentru s_n în consecință și se refac calculele, în baza rezultatelor obținute adoptându-se valorile definitive D și L ale acestor dimensiuni care sînt convenabile.

Dimensionarea statorului implică alegerea numărului de creștături statorice Z_1 , a dimensiunilor acestora, a numărului de spire N_1 și a structurii înfășurării, astfel ca solicitările magnetice în diferite părți ale miezului, precum și cele electrice, să fie cele normale. Adoptarea și stabilirea lor nu ridică probleme deosebite, făcîndu-se asemănător ca în cazul motoarelor de serie, corespunzător însă dimensiunilor D și L adoptate, care la nevoie pot suferi unele modificări (neesențiale).

Este recomandabilă alegerea lui Z_1 astfel ca înfășurarea să se poată realiza cu o deschidere a bobinelor $y/\tau = 5/6$ (cea mai potrivită) sau $y/\tau = 7/9$, în scopul reducerii influenței armonicilor de cîmp de ordinul $v = 5$ și 7.

În cazul motoarelor cu mărimi de pornire pretentioase, așa cum s-a demonstrat, numărul de spire N_1 va rezulta de circa $N_1 = N_1^*/\sqrt{\gamma} < N_1^*$ ale motorului de serie corespondent - a se vedea relația (3.20) - și prin aceasta încărcarea liniară A se va menține în limitele valorii normale - relația (3.21).

Observație. În cazul motoarelor de serie (mărimi de pornire

obisnuite) $s_n = s_n$ și deci D și L se stabilesc pe baza recomandărilor din literatură.

5.3. Parametrii statorici. Determinarea parametrilor rotorici necesari.

5.3.1. Parametrii statorici.

Cunoscînd dimensiunile și structura înfășurării statorice, parametrii statorici R_1 , X_1 , X_{1m} și X_{1s} (reactanța statorică saturată) se pot calcula, folosind relațiile lor date în literatură.

Pentru stabilirea valorii lui X_1 este necesară alegerea numărului de creștături din rotor, Z_2 , și a deschiderii lor b_{4r} , respectiv a întrefierului δ , care intervin în relația de calcul a reactanței diferențiale X_{1d} prin intermediul permeanței specifice⁵.

$$\lambda_{d1} = \frac{0,9 t_1 (q_1 k_{b1})^2 \rho_{d1} k_{o1}}{k_c \delta} \sigma_{d1} \quad (5.6)$$

unde : t_1 - pasul de creștătură statoric, $\rho_{d1} = f(Z_2)$, $k_{o1} = f(\delta)$, iar $k_c = f(Z_2, b_{4r}, \delta)$.

Alegerea întrefierului δ se face conform indicațiilor din literatură. În ceea ce privește adoptarea numărului de creștături rotorice Z_2 , avînd în vedere cele două cerințe contradictorii : factor de putere cît mai satisfăcător, respectiv curent de pornire redus, apare ca normală soluția alegerii unui Z_2 "mediu" între Z_{2min} și Z_{2max} recomandate corespunzător numărului de creștături Z_1 .

Pentru anihilarea cuplurilor parazite de tip sincron, barele (creștăturile) rotorice se vor realiza cu o înclinare obișnuită, egală cu t_1 ; factorul de înclinare corespunzător, apropiat de unitate, influențează în mică măsură valoarea parametrilor rotorici reduși la stator.

Reactanța X_1 , cu observațiile de mai sus, se calculează în modul cunoscut.

Pentru stabilirea reactanței de magnetizare X_{m1} trebuie aproximat curentul de mers în gol.

Având în vedere că motoarele cu mărimi de pornire pretențioase prezintă un factor de putere mai scăzut, acest curent, procentual, este mai mare decât la motoarele de serie corespondente.

Se poate aproxima, în aceste condiții, că $I_{10} \approx (0,3-0,5)I_{1n}$ valorile mai mari fiind valabile cu cât turația motorului este mai redusă.

Adoptând valoarea preliminară a curentului I_{10} (I_{1n} rezultă din datele de proiectare), se pot calcula :

$$U_{e1} \approx U_1 - X_1 I_{10} \quad (5.7)$$

$$X_{1m} \approx U_{e1} / I_{10} \quad (5.8)$$

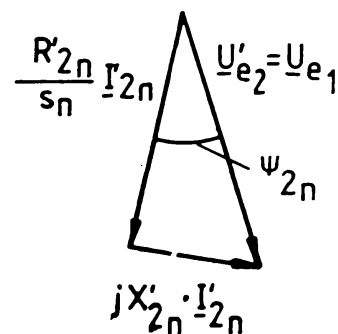
$$C_1 \approx 1 + X_1 / X_{m1} \quad (5.8)$$

Reactanța statorică saturată X_{1s} (valabilă la pornire) se calculează în modul cunoscut⁵, pe baza ei stabilindu-se și valoarea factorului C_{1s} .

5.3.2. Calculul lui s_n corespunzător statorului proiectat, la o solicitare electrică normală a rotorului.

Alunecarea nominală s_n , ca expresie de calcul, se poate stabili sub o formă comodă pentru determinarea valorii sale preliminare pornind de la diagrama fazorială privind circuitul rotoric (Figura 5.1).

Figura 5.1. Diagrama fazorială pentru partea rotorică a mașinii de inducție în regim de motor



Din diagramă rezultă că :

$$U'_{e2} \cos \psi_{2n} = \frac{R'_{2n}}{s_n} \cdot I'_{2n} \quad (5.10)$$

care ne duce la relația valabilă pentru alunecare :

$$s_n = \frac{R'_{2n} I'_{2n}}{U_{e1} \cos \psi_{2n}} \quad (5.11)$$

Rezistența rotorică se compune din rezistența barei din creștătură, R'_{cr2} , și rezistența comună a inelelor, ce revine unei faze (unei bare), R'_{c2} .

La motoare cu mărimi de pornire pretențioase, factorul de creștere a rezistenței rotorice la pornire urmează să fie mare ; cum acest factor privește numai rezistența barelor, este normal ca asemenea motoare să se proiecteze în așa fel încît : $R'_{c2} \ll R'_{cr2}$.

Dacă $q_e/q_i = \alpha < 1$, rezistența creștăturii (barei), la $s \leq s_n$, poate fi considerată în primă aproximație ca fiind rezistența părții de bară din creștăturile "coliviei de lucru inferioare", fiind

$$R'_{cr2} \approx \frac{R'_i}{1 + \alpha} \quad (5.12)$$

La un motor în dublă colivie, această bară este parcursă în regim de lucru ($s \leq s_n$) de curentul⁵ :

$$I'_{2ni} \approx \frac{I'_{2n}}{1 + \alpha} \quad (5.13)$$

Exprimînd rezistența R'_{2n} prin cele două componente ale sale (R'_{cr2} , R'_{c2}), alunecarea nominală se poate scrie sub forma :

$$s_n = \frac{R'_{cr2} I'_{2n}}{k_e U_1 \cos \psi_{2n}} + \frac{R'_{c2} I'_{2n}}{k_e U_1 \cos \psi_{2n}} \quad (5.14)$$

sau încă :

$$s_n = \frac{R'_{cr2} I'_{2n}}{k_e U_1 \cos \psi_{2n}} + \Delta s_n \quad (5.15)$$

unde Δs_n este mult mai mic decât primul termen.

Dacă introducem în (5.15) pe R'_{cr2} sub forma (5.12) și pe I'_{2n} sub forma (5.13) expresia alunecării devine :

$$s_n = \frac{R'_i I'_{2n}}{k_e U_1 \cos \psi_{2n}} + \Delta s_n \quad (5.16)$$

Dar rezistența barei interioare R'_i este :

$$R'_i = k \frac{\rho_{Al} L_b}{q_{b_i}} \quad (5.17)$$

în care : L_b este lungimea barei

q_{b_i} este secțiunea ei

k este factorul de reducere a parametrilor rotorici la stator. Acest factor, după cum se știe, este :

$$k = \frac{4m_1 (k_{b1} N_1)^2}{Z_2 k_{b2}^2} \quad (5.18)$$

Pe de altă parte, I'_{2n} este egal cu :

$$I'_{2n} = k_i I'_{2n} = \frac{2m_1 k_{b1} N_1}{Z_2 k_{b2}} I'_{2n} \quad (5.19)$$

unde factorul de reducere la stator a curentului rotorici este :

$$k_i = \frac{2m_1 k_{b1} N_1}{Z_2 k_{b2}} \quad (5.20)$$

Deci :

$$s_n = \frac{k \rho_{Al} L}{q_{b_i}} \cdot \frac{I_{2_n}}{k_i} \cdot \frac{1}{k_e U_1 \cos \psi_{2_n}} + \Delta s_n$$

$$\text{Observînd c\c{a} } I_{2_n} / q_{b_i} = j_2 \quad (5.21)$$

(densitatea de curent rotorică), iar

$$\frac{k}{k_i} = \frac{4m_1 (k_{b_1} N_1)^2}{Z_2 k_{b_2}^2} \cdot \frac{Z_2 k_{b_2}}{2m_1 k_{b_1} N_1} = 2 \frac{k_{b_1} N_1}{k_{b_2}}$$

rezultă pentru expresia lui s_n relația :

$$s_n = \frac{2 \rho_{Al} k_{b_1} N_1 L_b}{k_{b_2} k_e U_1 \cos \psi_{2_n}} \cdot j_2 + \Delta s_n \quad (5.22)$$

In această relație, ρ_{Al} , k_{b_1} , N_1 , L_b , k_{b_2} și U_1 sînt cunoscute, fiind determinate conform paragrafelor anterioare. Urmează a se adopta mărimile : k_e , $\cos \psi_{2_n}$ și j_2 , respectiv a se exprima cu cît crește alunecarea s_n datorită lui Δs_n .

Motoarele cu mărimi de pornire pretențioase se caracterizează, după cum s-a văzut, printr-o reactanță X'_{2_n} în general mult sporită față de aceea a motoarelor de serie.

Este normal deci a se alege pentru k_e și $\cos \psi_{2_n}$ valori mai reduse decît în cazul motoarelor obișnuite, în special pentru $\cos \psi_{2_n}$.

Se poate aprecia că la motoare cu mărimi de pornire pretențioase $k_e = (0,98 - 0,99)k_e^*$, unde k_e^* corespunde motorului de serie respectiv și că :

$$\cos \psi_{2_n} \approx 0,91 - 0,95$$

Valorile mai mici sînt valabile pentru factori de putere (impuși)

mai mici.

Densitatea de curent j_2 se adoptă pe baza indicațiilor din literatură, spre limita superioară.

Admițând că Δs_n reprezintă 10-15% din valoarea primului termen, se obține în definitiv :

$$s_n \approx (1,1 - 1,15) \frac{2 \rho_{Al} k_{b1} N_1 L_b}{k_{b2} k_e U_1 \cos \psi_{2n}} j_2 \quad (5.23)$$

Relația (5.23) ne permite să preluăm deci o valoare probabil apropiată de aceea reală a alunecării s_n care ne trebuie pentru a putea stabili valorile necesare ale parametrilor rotorici.

Cu multă probabilitate, s_n obținut cu (5.23) va diferi întrucâtva de valoarea aleasă la determinarea dimensiunilor principale; întrucât D și L se adoptă și funcție de dimensiunile standardizate ale lui D_e , ele nu se mai recalculază.

5.3.3. Determinarea parametrilor rotorici necesari.

Pentru determinarea parametrilor rotorici necesari la pornire trebuie pornit de la cuplul de pornire m_p și curentul de pornire i_p .

Rezistența rotorică la pornire, necesară, se poate exprima sub forma²⁶ :

$$R'_{2p} = \frac{m_p}{i_{2p}^2} \cdot \frac{m_1}{P_m} (k_e U_1 \cos \psi_{2n})^2 (1 - s_n) \quad (5.24)$$

unde P_m este puterea mecanică totală, egală cu puterea interioară (electromagnetică) nominală plus puterea mecanică pierdută prin frecările din lagăre și ventilație.

Pierderile p_{mv} se adoptă prin asimilarea lor cu cele ale motoarelor obișnuite, eventual majorate cu circa 5-10%.

Deoarece motoarele cu mărimi de pornire pretențioase sînt caracterizate prin factori de putere mai mici decît motoarele de serie, curentul relativ $i_{2p} = I'_{2p} / I'_{2n}$ este mai mare decît la motoarele de serie.

Experiența arată că la motoarele cu mărimi de pornire pretențioase se poate considera că :

$$i_{2p} \cong (1,12 - 1,18)i_p \quad (5.25)$$

În relația (5.24), aproximând pe k_e și pe $\cos \psi_{2n}$ (egali cu cei considerați în §5.3.2) și luând în considerare pentru s_n valoarea rezultată cu relația (5.23), se poate calcula valoarea pe care urmează să o aibă rezistența R'_{2p} .

Cunoscînd astfel valoarea necesară a lui R'_{2p} , rezistența echivalentă, la pornire, a motorului rezultă :

$$R_p = R_1 + C_{1s} R'_{2p} \quad (5.26)$$

Relația de calcul pentru impedanța echivalentă de pornire a întregii mașini este dedusă²⁶ sub forma :

$$Z_p = \frac{i_{2p}}{m_p} \cdot \frac{C_{1s} R'_{2p}}{\cos \psi_{2n}} \quad (5.27)$$

care poate fi deci calculată. Rezultă reactanța echivalentă necesară a mașinii :

$$X_p = \sqrt{Z_p^2 - R_p^2} \quad (5.28)$$

Cum aceasta este :

$$X_p = X_{1s} + C_{1s} X'_{2p}$$

valoarea necesară a reactanței rotorice la pornire rezultă ca fiind

$$X'_{2p} = \frac{X_p - X_{1s}}{C_{1s}} \quad (5.29)$$

și aceasta poate fi, prin urmare, calculată.

Rezistența rotorică nominală necesară se poate calcula²⁶ din relația de legătură dintre R'_{2p} și R'_{2n} , exprimîndu-se sub forma :

$$R'_{2n} = \frac{i_2^2}{m_p} R'_{2p} s_n \quad (5.30)$$

Din expresia lui $\cos \psi_{2n}$

$$\cos \psi_{2n} = \frac{R'_{2n}}{\sqrt{R'_{2n} + s_n^2 X'_{2n}}}$$

pe de altă parte, rezultă că :

$$X'_{2n} = \frac{R'_{2n} \sqrt{1 - \cos^2 \psi_{2n}}}{s_n \cos \psi_{2n}} \quad (5.31)$$

Cu relațiile (5.30) și (5.31) pot fi deci calculați parametrii rotorici nominali necesari, R'_{2n} și X'_{2n} ca valori preliminare, dar destul de exacte.

Curentul rotoric redus la stator, la rîndul său, este²⁶ :

$$I'_{2n} = \frac{P_m}{m_1 k_e U_1 \cos \psi_{2n}} \cdot \frac{1}{1 - s_n} \quad (5.32)$$

unde P_m , k_e , $\cos \psi_{2n}$ și s_n au valorile considerate în calculele anterioare.

În acest mod, pe baza datelor de proiectare impuse, se pot calcula, cu o oarecare aproximație (în general redusă), parametrii rotorici necesari la pornire, respectiv în regim nominal, cât și curentul rotoric redus la stator I'_{2n} .

Cunoscînd aceste mărimi, se poate trece la calculul de dimensionare a creștăturilor rotorice necesare (de tipul din Figura 4.1).

5.4. Stabilirea formei și dimensiunilor necesare ale creștăturilor din rotor.

Încercările experimentale ale mai multor motoare asincrone în dublă colivie, turnate în aluminiu și cu mărimi de pornire preten-

țioase, au arătat¹¹ că R'_{2n} se poate calcula destul de exact cu relația recomandată în literatură :

$$R'_{2n} = R'_{c2} + R'_{E_{2n}} \approx R'_{E_{2n}} = \frac{R'_e R'_i}{R'_e + R'_i} \quad (5.33)$$

unde rezistențele "celor două colivii", considerate separat, sînt :

$$R'_e = 0,95 \frac{1 + \alpha}{\alpha} R'_{2n} \quad (5.34)$$

$$R'_i = 0,95(1 + \alpha) R'_{2n} \quad (5.35)$$

(factorul 0,95 ținînd seama de existența rezistenței R'_{c2}).

Pentru a determina exact aceste rezistențe trebuie ales α . În literatură³⁴ se demonstrează că în funcție de valoarea acestui α rezultă în curba cuplului o "șea", mai mult sau mai puțin accentuată, respectiv că aceasta dispare complet cînd cercurile de lucru și de pornire sînt ortogonale.

Studiile executate arată²¹ că acest lucru are loc pentru $\alpha_T = 0,4 - 0,35$, în funcție de raportul $X'_{E_{2n}} / R'_{E_{2n}}$.

($\alpha_T = 0,4$ cînd $X'_{E_{2n}} / R'_{E_{2n}} = 3$, respectiv $0,35$ cînd $X'_{E_{2n}} / R'_{E_{2n}} = 9$).

Dar la asemenea valori ale lui α rezultă și o creștere³⁴ a lui i_p față de valoarea minimă posibilă.

La motoarele cu mărimi de pornire pretențioase, i_p impus fiind mic, soluția este să alegem o valoare $\alpha < \alpha_T$ (mai mică, însă nu în mod exagerat, pentru ca șeaua curbei cuplului să nu rezulte prea accentuată).

Pentru a asigura cele două condiții care se cer motoarelor cu mărimi de pornire pretențioase și anume :

- curent de pornire i_p mic ;
 - cuplul de pornire minim mai mare decît cuplul nominal,
- mărimea α trebuie deci aleasă de o valoare $\alpha < \alpha_T$ și în același timp să nu fie prea mică.

La motoarele cu mărimi de pornire pretențioase s-a constatat, în cazul mai multor motoare executate, că pentru un $\alpha \cong (0,2 - 0,26)$ ambele cerințe sînt îndeplinite în mod satisfăcător.

Adoptînd în acest fel valoarea lui α , se pot stabili valorile rezistențelor, pe baza cărora se pot stabili secțiunile q_e , q_i necesare :

$$q_e = \frac{k \rho_{Al} L_b}{R'_e} ; \quad q_i = \frac{k \rho_{Al} L_b}{R'_i} \quad (5.36)$$

unde L_b este lungimea unei bare (ceva mai mare decît L , dacă barele sînt înclinate).

Colivia de pornire (exterioară) avînd secțiune circulară (rotundă), pentru secțiunea q_e corespunde diametrul :

$$d_e = \sqrt{\frac{4}{\pi} q_e} \quad (5.37)$$

Din motive de ordin tehnologic (posibilități de a realiza ștanțarea mai ușoare), se adoptă pentru d_e valoarea cea mai apropiată de cea rezultată cu (5.37), cu o singură zecimală (în mm). Se recalculează valoarea reală a lui q_e , care reprezintă secțiunea care se va lua în considerație în calculele ulterioare.

Pentru dimensionarea istmului și a creștăturii inferioare se calculează pentru început λ_{c_e} a creștăturii coliviei exterioare, valabilă cînd istmul este ocupat și el de material conductor (aluminu), cu relația propusă în literatură⁶ :

$$\lambda_{c_e} \cong \frac{4}{\pi} (0,75 - 0,5 \ln \frac{b_4 r}{d_e}) \quad (5.38)$$

Permeanța creștăturii rotorice în regim de lucru, λ_{cr_2} , necesară pentru ca să rezulte reactanța X'_{2n} , stabilită conform para-grafului anterior, corespunde reactanței de creștătură

$$X'_{cr_2} = X'_{2n} - X'_{c_2} \quad (5.39)$$

unde reactanța comună X'_{c_2} este :

$$X'_{c_2} = X'_{\delta_2} + X'_{d_2} + X'_{f_2} = 2\pi f_1 \mu_0 L (\lambda_{\delta_2} + \lambda_{d_2} + \lambda_{f_2}) \quad (5.40)$$

Permeanțele specifice care intervin în (5.40) sînt⁵ :

$$\lambda_{\delta_2} = \frac{h_{4r}}{b_{4r}},$$

$$\lambda_{d_2} \approx \frac{1,647}{Z_2^2} p^2 \frac{X_{1m}}{\pi f_1 \mu_0 L k} \quad (5.41)$$

$$\lambda_{f_2} \approx \lambda_{\delta_2}$$

A doua relație (5.41) corespunde egalității :

$$X'_{d_2} = 2\pi f_1 \mu_0 L \lambda_{d_2} k = \sigma_{d_2} X_{1m}$$

unde

$$\sigma_{d_2} = \frac{9,15 \cdot 10^{-2}}{q_2^2} = \frac{9,15 \cdot 10^{-2}}{Z_2^2} 36 p^2 = \frac{3,294 p^2}{Z_2^2}$$

Relația (5.41) aproximează, pentru început, permeanța specifică frontală (de valoare foarte mică), în situația în care inelele de scurtcircuitare sînt lipite de miez.

Se determină, cunoscînd în acest fel, X'_{2n} (stabilită ca necesară) și X'_{c_2} (calculată cu (5.40)), reactanța ce revine creșterii X'_{cr_2} cu relația (5.39) și deci permeanța specifică necesară a creșterii :

$$\lambda_{cr_2} = \frac{X'_{cr_2}}{2\pi f_1 \mu_0 L k} \quad (5.42)$$

Permeanța specifică λ_{cr_T} , corespunzătoare creșterii în T a istmului plus cea echivalentă, dreptunghiulară, a coliviei cu creștături ovale ale coliviei de lucru, rezultă ca fiind diferența

$$\lambda_{cr_{2T}} = \lambda_{cr_2} - \lambda_{c_e} \quad (5.43)$$

Ea se exprimă⁵ cu relația :

$$\lambda_{cr_{2T}} = \frac{h_e}{3b_o} (1 + uv^3 - u^3v^3) \quad (5.44)$$

unde h_e este înălțimea echivalentă, de calcul :

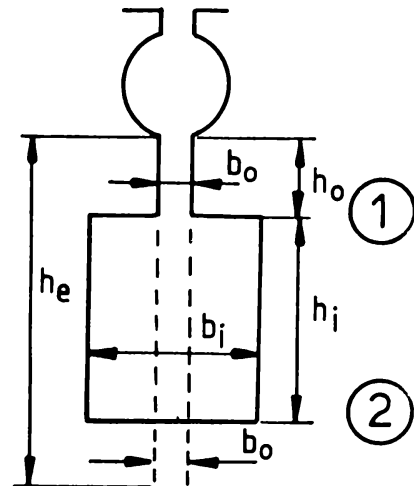
$$h_e = \frac{b_o h_o + b_i h_i}{b_o} = h_o + h_i \frac{b_i}{b_o} \quad (5.45)$$

respectiv :

$$u = b_i/b_o ; \quad v = h_i/h_e \quad (5.46)$$

(a se vedea Figura 5.2).

Figura 5.2. Crestătura în T echivalentă ansamblului istm plus crestătura ovală a coliviei de lucru.



Pentru a putea determina înălțimea h_i , respectiv înălțimea h_e , este necesar să fie cunoscute dimensiunile b_i , b_o , h_o .

Dimensiunile preliminare ale istmului se pot determina pe baza valorii necesare a rezistenței R'_{2p} , determinată anterior ca fiind necesară (Capitolul IV). Rezultă anume că secțiunea activă la pornire, care trebuie realizată, este :

$$q_{2p} \approx q_e + \frac{q_o}{(1 + \alpha)^2} = \frac{k \rho_{Al} L_b}{R'_{2p}} \quad (5.47)$$

unde toate mărimile din ultimul membru sînt cunoscute.

Se obține astfel secțiunea q_0 , necesară, a istmului

$$q_0 \cong \beta \left(\frac{k \rho_{Al} L_b}{R_2^2 p} - q_e \right) (1 + \alpha)^2 \quad (5.48)$$

unde $\beta = 1,12 - 1,47$ reprezintă un factor de corecție care ține seama de faptul că termenul $q_0 / (1 + \alpha)^2$ are, într-o măsură, un caracter aproximativ (fapt rezultat în urma calculelor concrete executate în cazul mai multor motoare).

Lățimea istmului, din motive tehnologice, se adoptă preliminar, $b_0 = 1 - 1,5$ mm. Pentru a nu fi necesară adoptarea unei înălțimi a istmului exagerat de mare (în vederea realizării raportului h_0/b_0 necesar) este de dorit a se adopta b_0 cât mai mic (spre limită $b_{0\min} = 1$ mm) care se poate realiza la ștanțare. Înălțimea necesară a istmului rezultă ca fiind :

$$h_0 = q_0 / b_0 \quad (5.49)$$

Din motive tehnologice se recomandă ca h_0 și b_0 , exprimați în mm, să se adopte cu o singură zecimală.

Lățimea b_i a creștăturii coliviei de lucru echivalentă dreptunghiulară, pentru a nu se satura inadmisibil dinții rotorici în această zonă, nu poate avea o valoare prea mare. Experiența de proiectare a motoarelor în dublă colivie turnate în aluminiu arată că ea trebuie să fie aproximativ

$$b_i \cong (0,2 - 0,24) t_1 \quad (5.50)$$

$$\text{unde } t_1 = \frac{\pi D}{Z_1}$$

Alegând b_i în acest fel, înălțimea

$$h_i = \frac{q_i}{b_i} \quad (5.51)$$

Pentru dimensiunile creștăturii rotorice dreptunghiulare echivalente părții de creștătură ovală astfel determinate, se calculează inducțiile cîmpului magnetic la nivelele ① și ② (a se vedea Figura 5.3).

Dacă ele rezultă mai mari decât valoarea maximă admisibilă a inducției în dinții rotorici, urmează a se modifica, în principal, înălțimea istmului (h_0), care se micșorează astfel ca să avem $B_{d_i} \leq B_{d_{max}}$, refăcînd, evident, toate calculele ulterioare.

②

Pentru stabilirea dimensiunilor creștăturilor (barelor) rotorice de formă ovală, se calculează inducția medie

$$B_{d_{i_{med}}} = \frac{B_{d_1} + B_{d_2}}{2} \quad (5.52)$$

și se determină lățimile d_1 și d_2 (Figura 5.3) pentru care, la h_{4r} , d_e și h_0 stabilite, $B_{d_1}^*$ și $B_{d_2}^*$ rezultă practic de valoarea

$B_{d_{i_{med}}}$ (adică $b_d' \approx b_d''$ - vezi Figura 5.3)

În acest fel, dimensiunile necesare, ca valori inițiale, ale creștăturilor rotorice sînt determinate.

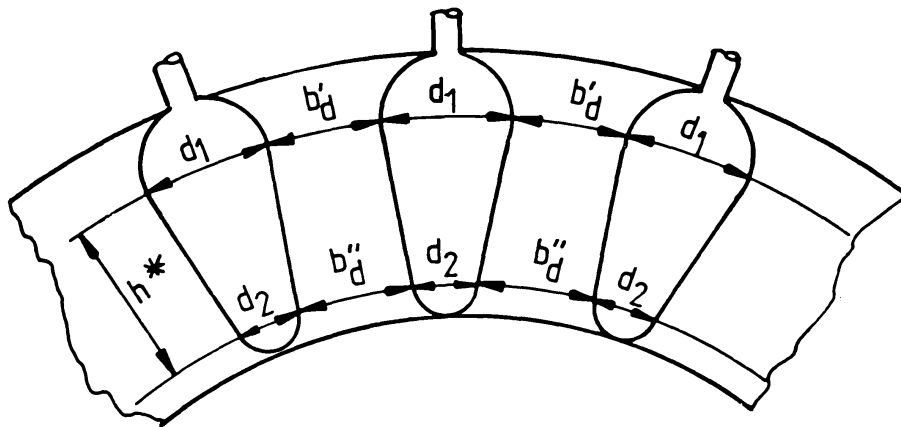


Figura 5.3. Creștătura coliviei de lucru la care dinte rotorice este practic constant ($b_d' \approx b_d''$).

Ele sînt corecte (conduc la X'_{cr2} necesar) dacă, pentru aceste dimensiuni, cu

$$q_i = \frac{d_1 + d_2}{2} h^* + \frac{\pi}{8} (d_1^2 + d_2^2) \quad (5.53)$$

permeanța λ_{cr_2} rezultă de valoarea necesară (practic) stabilită cu relația (5.42). Dacă această permeanță λ_{cr_2} rezultă diferită relativ mult de cea necesară, urmează a se aduce modificările necesare, privind pe h_0 , d_1 , d_2 - ajungându-se astfel la dimensiuni definitive ale creștăturilor rotorice.

5.5. Calculul parametrilor rotorului proiectat.

Dimensiunile creștăturilor rotorice fiind stabilite, se poate trece la determinarea parametrilor rotorului proiectat R'_{2n} , X'_{2n} , R'_{2p} , X'_{2p} .

Pentru a calcula rezistența nominală R'_{2n} se determină pentru început rezistențele R'_e și R'_i cu relația :

$$R'_\lambda = \frac{k \rho_{Al} L_b}{q_\lambda} \quad (5.54)$$

unde λ semnifică respectiv "e" și "i", iar q_e și q_i sînt secțiunile ce corespund formei și dimensiunilor stabilite conform §5.4.

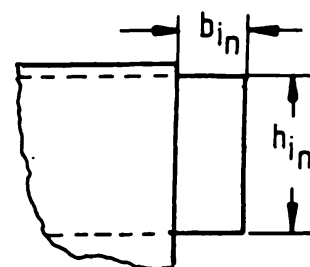
Pe baza celor de mai sus, rezultă R'_{cr_2} , la $s = s_n$, cu relația (5.33) și se adoptă dimensiunile inelelor și anume :

$$h_{in} = h_{cr_2} - h_{4r} \quad (5.55)$$

respectiv lățimea b_{in} - Figura 5.4 (indicele "in" se referă la inelele de scurtcircuitare). Aceasta trebuie să fie mai mare decît valoarea pentru care⁵ :

$$q_{in} \approx h_{in} \cdot b_{in} = \frac{q_i + q_0}{1,5 \sin^2\left(\frac{\pi p}{Z_2}\right)} \quad (5.56)$$

Figura 5.4. Reprezentarea secțiunii care arată lățimea b_{in} și înălțimea h_{in} a inelelor.



Dimensiunile inelelor sînt potrivite dacă

$$j_{in} < j_{bară}$$

Cunosc nd astfel b_{in}  i h_{in} se poate calcula rezistența frontală R'_{c_2} , în sensul că este comună celor trei p r i ale crestăturilor.

Se obține astfel rezistența rotorică

$$R'_{2n} = R'_{cr_2} + R'_{c_2} \quad (5.57)$$

Dacă rezistența rotorică rezultă mai mare dec t rezistența R'_{2n} stabilită ca necesară, solu ia cea mai simplă este mărirea constructivă a l t imii inelelor, b_{in} .

Pentru reactanța X'_{2n} care corespunde rotorului proiectat se determină componentele sale X'_{cr_2}  i X'_{c_2} cu relația :

$$X'_{v_2} = 2\pi f_1 \mu_0 L \lambda_{v_2} \quad (5.58)$$

unde $v = cr$, respectiv c .

Permeanța specifică λ_{cr_2} se calculează ca fiind (a se vedea  i relația (5.43)) :

$$\lambda_{cr_2} = \lambda_{c_e} + \lambda_{cr_T} \quad (5.59)$$

Cele două componente ale sale se calculează folosind relațiile menționate - relațiile (5.38)  i (5.44) - în care valorile diferitelor dimensiuni care intervin sînt cele ale crestăturii stabilite.

 n ceea ce privește permeanța specifică :

$$\lambda_{c_2} = \lambda_{\delta_2} + \lambda_{d_2} + \lambda_{f_2} \quad (5.60)$$

acesteia trebuie să i se aducă o corectură fa   de valoarea stabilită în  5.4, prin introducerea permeanței λ_{f_2} cu valoarea ei ce corespunde inelelor prevăzute.

Ea se calculează cu relația⁵ :

$$\lambda_{f_2} = \frac{2,3 D_i}{4 \sin^2\left(\frac{\pi p}{Z_2}\right) Z_2 L} \log \frac{4,7 D_i}{h_{in} + 2 b_{in}} \quad (5.61)$$

unde $D_i = D - 2\delta - 4 h_{4r} - h_{in}$ este diametrul mediu al inelelor de scurtcircuitare.

Reactanța de dispersie rotorică rezultă astfel ca fiind :

$$X'_{2n} = X'_{cr_2} + X'_{c_2} \quad (5.62)$$

În ceea ce privește parametrii de pornire, aceștia se calculează după cum urmează :

a) Rezistența de pornire :

$$R'_{2p} = \frac{k \rho_{Al} L_b}{q_{2p}} + R'_{c_2} \quad (5.63)$$

$$\text{unde } q_{2p} \approx q_e + \frac{q_o}{\beta(1 + \alpha)^2}$$

b) Reactanța de pornire :

$$X'_{2p} = X'_{cr_{2p}} + X'_{c_{2s}} \quad (5.64)$$

În care $X'_{cr_{2p}}$ este reactanța crestăturii rotorice în condițiile de refulare a curentului la pornire, iar $X'_{c_{2s}}$ reactanța comună saturată.

Prima componentă corespunde permeanței specifice

$$\lambda_{cr_p} = k_x \lambda_{cr_2} \quad (5.65)$$

În care k_x este factorul de micșorare a dispersiei rotorice, la pornire, din cauza saturației. Conform metodei propuse în Capitolul IV - relația (4.19) :

$$k_x \approx \frac{3}{2\xi} \quad (5.66)$$

unde ξ corespunde înălțimii "aparente" dreptunghiulare echivalente, caracterizată prin λ_{cr2} și lățimea

$$b_i = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

Înălțimea acestei creștături, echivalentă din punct de vedere al dispersiei, este :

$$h_{cr\sigma} = 3b_i \lambda_{cr2} \quad (5.67)$$

Cu acestea rezultă că :

$$\xi = \alpha h_{cr\sigma} = h_{cr\sigma} \sqrt{\frac{\omega_1 \mu_0}{2 \rho_{Al}}} \quad (5.68)$$

care urmează a fi folosită în relația (5.66).

A doua componentă, X'_{c2s} corespunde permeanței specifice λ_{c2s} , care se poate calcula după metoda obișnuită⁵.

Parametrii rotorului proiectat, calculați precum s-a arătat mai sus validează - sau nu - corectitudinea dimensiunilor de creștătură rotorice stabilite conform §5.4.

Aceste dimensiuni se dovedesc a fi corecte dacă parametrii rotorici rezultați prin prezentul calcul nu diferă prea mult (maximum +/- 2,5 - 3%) de cei determinați ca necesari.

Dacă abaterile sînt mai mari, urmează a se modifica în mod potrivit una sau mai multe dimensiuni ale creștăturii (h_0 , d_1 , d_2 , h^*) astfel ca respectivele abateri să se înscrie în limitele admisibile.

5.6. Ordinograma și programul de calcul pentru determinarea dimensiunilor creștăturilor rotorice.

Determinarea dimensiunilor creștăturilor rotorice, pentru ca să rezulte parametrii rotorici necesari satisfacerii mărimilor energetice în regim de lucru, respectiv a celor de pornire la conectarea motorului la rețea, este o problemă esențială a proiectării motorului asincron în dublă colivie turnat în aluminiu.

Avînd în vedere că stabilirea dimensiunilor de creștături rotorice, în acest context, este o problemă care necesită calcule asupra cărora, în general, sînt necesare reveniri, am conceput o ordinogramă și un program de calcul, pe care l-am denumit DIMCR, prin care să se obțină valorile necesare ale dimensiunilor creștăturilor rotorice de tip circular în partea superioară, istm (ocupat de material conductor) și o parte inferioară ovală.

Ordinograma acestui program de calcul este reprezentată în Figura 5.5.

Datele de intrare prevăzute sub punctul a) sînt : frecvența f_1 (Hz), numărul de perechi de poli p , dimensiunile principale ale mașinii D și L (m), întrefierul δ (m), numerele de creștături Z_1 și Z_2 , dimensiunile h_{4r} și b_{4r} (m), factorul de înclinare a barelor rotorice k_{b2} , factorul de raportare a parametrilor rotorici la stator k , mărimile ρ_{Al} ($\Omega \cdot m$), μ_0 și B_δ (T), precum și parametrii rotorici necesari R'_{2n} (Ω), R'_{2p} (Ω), X'_{2n} (Ω), X'_{2p} (Ω) și reactanța de magnetizare X'_{1m} (Ω), determinați în prealabil.

La punctul b) se adoptă (§5.4) valoarea lui $\alpha = 0,2 - 0,26$.

c) Se calculează R'_e , R'_i cu relațiile (5.34) și (5.35) și secțiunile q_e și q_i cu relațiile (5.36).

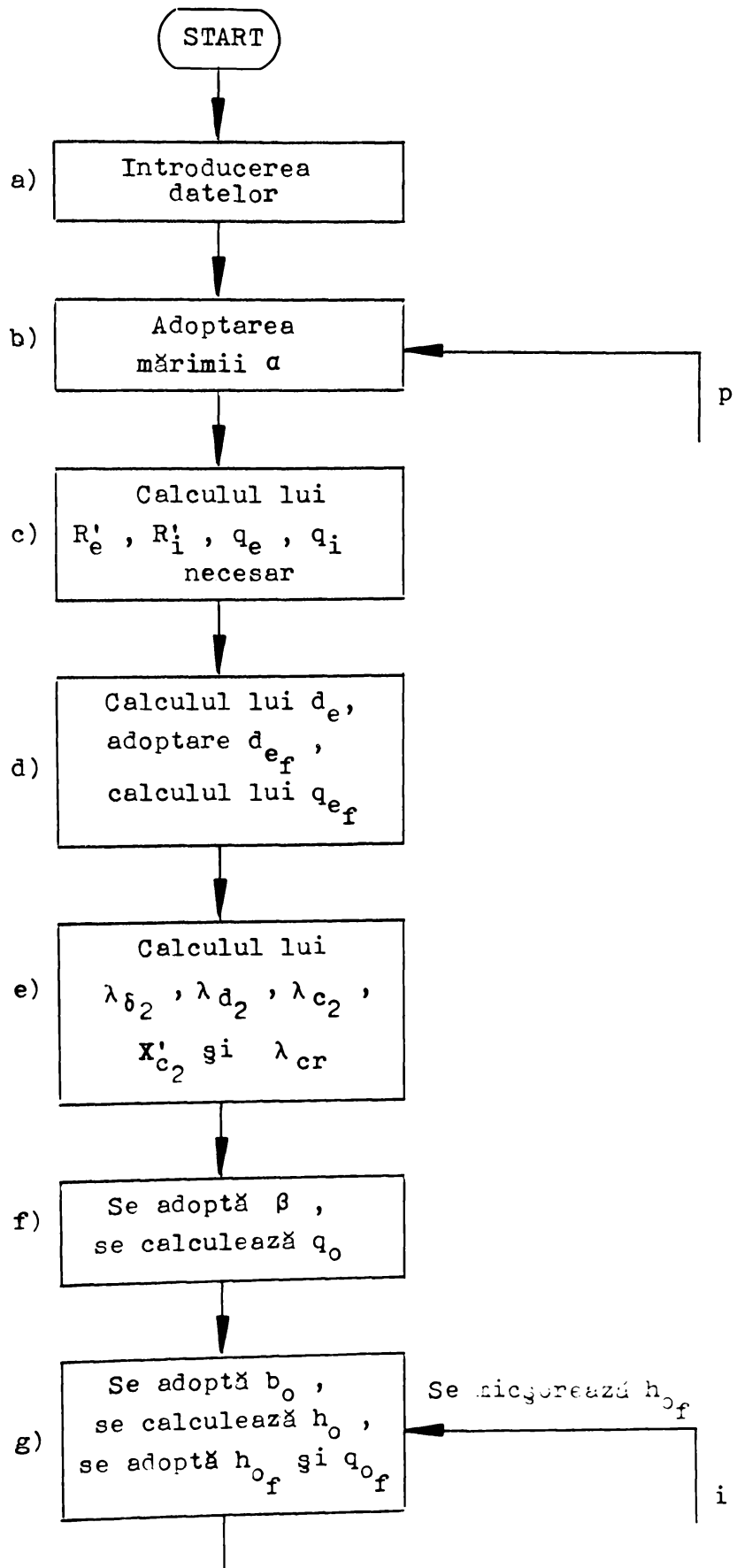
d) Se calculează d_e (relația (5.37)) și se adoptă valoarea d_{ef} cea mai apropiată avînd, în mm, o singură zecimală. Se calculează secțiunea corespunzătoare

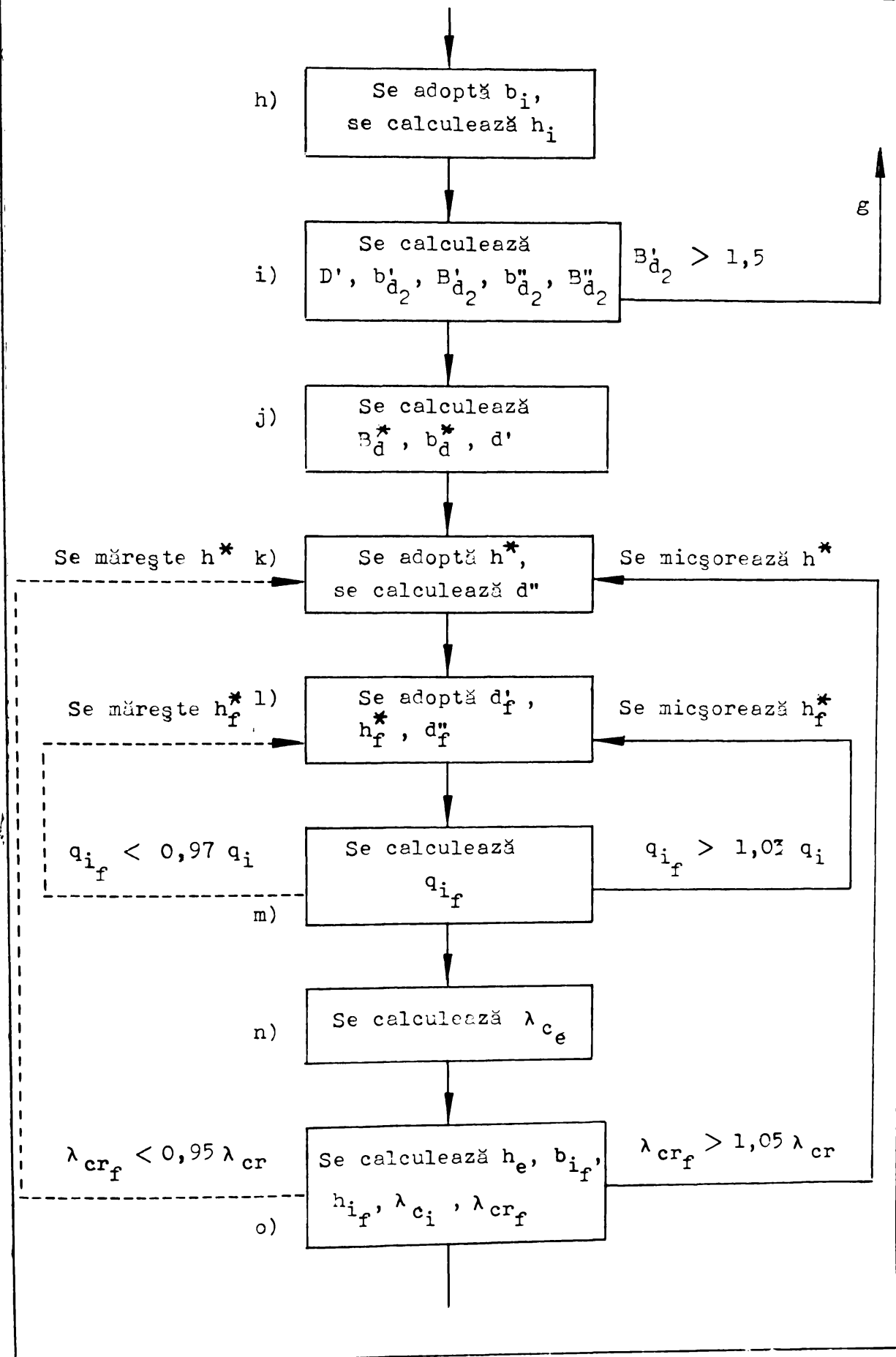
$$q_{ef} = \frac{\pi}{4} d_{ef}^2$$

e) Pentru calculul permeanțelor specifice $\lambda_{\delta 2}$, λ_{d2} , λ_{f2} se folosesc relațiile (5.41); se calculează X'_{c2} - relația (5.40), reactanța X'_{cr2} - relația (5.39) și permeanța specifică necesară a creștăturii, respectiv λ_{cr2} - relația (5.42).

f) Se adoptă $\beta \approx (1,12 - 1,5)$ și se calculează secțiunea q_0 cu relația (5.48).

g) Se admite b_0 și se calculează h_0 - relația (5.49). Se adoptă valorile cele mai apropiate b_{of} și h_{of} avînd în mm o singură ze-





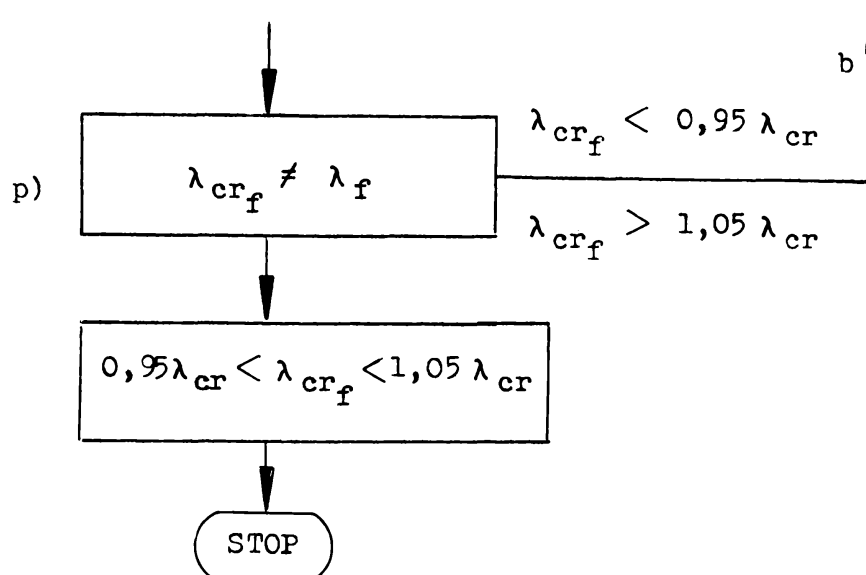


Figura 5.5. Ordinograma de calcul.

cimală. Se calculează :

$$q_{of} = b_{of} h_{of}$$

h) Se adoptă b_i - relația (5.50) și se calculează înălțimea h_i - relația (5.51).

i) Se calculează dimensiunea

$$D' = 2(\delta + h_{4r} + d_{ef} + h_{of})$$

lățimile de dinți

$$b'_{d_2} = \frac{\pi(D - D')}{Z_2} - b_i ,$$

$$b''_{d_2} = \frac{\pi(D - D' - 2h_i)}{Z_2} - b_i ,$$

respectiv inducțiile :

$$B'_{d_2} = \frac{\pi DB_\delta}{0,95 \cdot Z_2 b'_{d_2}} \quad \text{și} \quad B''_{d_2} = \frac{\pi DB_\delta}{0,95 \cdot Z_2 b''_{d_2}}$$

- Dacă $B'_{d_2} > 1,5$ (T) (respectiv $B''_{d_2} > 1,9$ (T)) se revine la punctul g), micșorînd corespunzător înălțimea h_{of}

- Dacă $B'_{d_2} \leq 1,5$ (T) și $B''_{d_2} \leq 1,9$ (T) se continuă calculul.

- j) Se calculează $B_{d_{i_{med}}}$ (relația (5.52)) și lățimea corespunzătoare a dintelui

$$b_{d_{2_{med}}} = \frac{\pi D B_{\delta}}{0,95 \cdot Z_2 B_{d_{i_{med}}}}$$

Dimensiunea d_1 (a se vedea Figura 5.3) rezultă

$$d_1 = \frac{\pi(D - D')}{Z_2} - b_{d_{2_{med}}}$$

- k) Se admite h^* (Figura 5.3), de valoarea

$$h^* = h_i - \gamma$$

unde $\gamma = 4 - 6,5$ mm și se calculează dimensiunea

$$d_2 = \frac{\pi(D - D' - d_1 - 2h^*)}{Z_2} - b_{d_{2_{med}}}$$

- l) Se adoptă valorile finale, cele mai apropiate, avînd o singură zecimală (în mm) : d_{1_f} , h_f^* , $d_{2_f} \geq 2$ mm

Dacă $d_{2_f} < 2$ mm, se adoptă pentru d_1 o valoare mai mică decît cea inițială, $d_{2_f} = 2$ mm și h^* pentru care rezultă secțiunea $q_i = q_i$ necesar.

- m) Se calculează secțiunea corespunzătoare q_{i_f} - relația (5.53) în care se introduc d_{1_f} , d_{2_f} , h_f^* .

Dacă $q_{i_f} > 1,03 q_i$ sau $q_{i_f} < 0,97 q_i$ se revine la punctul

l) modificînd corespunzător dimensiunea h^* (se micșorează sau se mărește) și se recalculază d_2 , d_{2_f} , q_{i_f} .

Dacă $1,03 q_i > q_{i_f} > 0,97 q_i$ calculul se continuă.

- n) Se calculează λ_{c_e} - relația (5.38)

- o) Se calculează :

$$b_{i_f} = \frac{d_{1_f} + d_{2_f}}{2}$$

$$h_{i_f} = \frac{q_{i_f}}{b_{i_f}},$$

$$h_e = \frac{q_{o_f} + q_{i_f}}{b_o},$$

$$\lambda_{cr_{2T}} = \frac{h_e}{b_o} \left[1 + \frac{b_{i_f}}{b_o} \left(\frac{h_{i_f}}{h_e} \right)^3 + \left(\frac{b_{i_f}}{b_o} \cdot \frac{h_{i_f}}{h_e} \right)^3 \right],$$

$$\lambda_{cr_{2f}} = \lambda_{c_e} + \lambda_{cr_{2T}}$$

Dacă $\lambda_{cr_{2f}} > 1,05 \lambda_{cr_2}$ sau $\lambda_{cr_{2f}} < 0,95 \lambda_{cr_2}$ (unde

λ_{cr_2} are valoarea obținută la punctul e)) se revine la punctul b), modificându-se valoarea lui a .

Dacă $0,95 \lambda_{cr_2} < \lambda_{cr_{2f}} < 1,05 \lambda_{cr_2}$, calculul este înche-

iat, dimensiunile creștăturii rotorice fiind :

$d_{e_f}, b_{o_f}, h_{o_f}, d_{1_f}, d_{2_f}, h_f$.

Programul de calcul, întocmit conform celor de mai sus, este prezentat în anexa A.1, iar listările pentru motoarele de 15 kW, 750 rpm și 22 kW, 1000 rpm, considerate și anterior, în anexele A.2 și A.3.

Rezultatele obținute corespund celor reale. Astfel :

a) Motorul de 15 kW și 750 rpm executat și încercat are următoarele dimensiuni de creștătură rotorică (Figura 5.6) :

$$b_{4_r} = 2,2 \text{ mm} \quad h_{4_r} = 1,2 \text{ mm} \quad d_e = 4,2 \text{ mm}$$

$$b_o = 1 \text{ mm} \quad h_o = 11,6 \text{ mm} \quad h^* = 17,3 \text{ mm}$$

$$d_1 = 3,6 \text{ mm} \quad d_2 = 2 \text{ mm} \quad a = 0,245$$

Conform anexei A.2 au rezultat ca fiind necesare, pentru a obține λ_{cr_2} real :

$$d_{e_f} = 4,2 \text{ mm} \quad b_{o_f} = 1 \text{ mm} \quad h_{o_f} = 11,66 \text{ mm}$$

$$h_f = 17,2 \text{ mm} \quad d_{1_f} = 3,6 \text{ mm} \quad d_{2_f} = 2 \text{ mm}$$

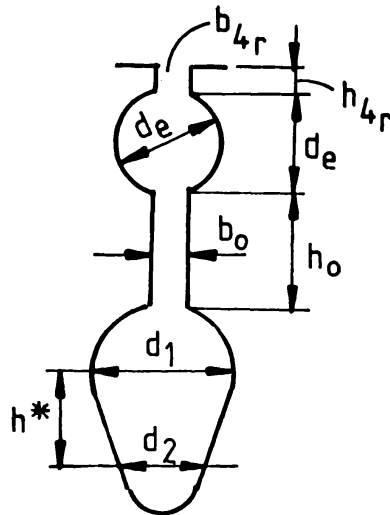


Figura 5.6. Crestătura rotorică adoptată pentru motoarele de 15 kW, 750 rpm și de 22 kW, 1000 rpm.

Diferențele, de altfel nesemnificative, privind pe h_0 și h au rezultat în urma adoptării unor dimensiuni realizabile mai ușor tehnologic, prin limitarea lor la valori, în mm, cu o singură zecimală.

b) Motorul de 22 kW și 1000 rpm, executat și încercat, se caracterizează prin (Figura 5.6) :

$$\begin{aligned} b_{4r} &= 2,2 \text{ mm} & h_{4r} &= 1,2 \text{ mm} & d_e &= 4,2 \text{ mm} \\ b_o &= 1 \text{ mm} & h_o &= 16,4 \text{ mm} & h^* &= 19,3 \text{ mm} \\ d_1 &= 3,8 \text{ mm} & d_2 &= 2 \text{ mm} & \alpha &= 0,2487 \end{aligned}$$

Conform anexei A.3 au rezultat ca necesare :

$$\begin{aligned} d_{e_f} &= 4,1 \text{ mm} & b_{o_f} &= 1 \text{ mm} & h_{o_f} &= 20,15 \text{ mm} \\ h_f &= 17,4 \text{ mm} & d_{1_f} &= 4,1 \text{ mm} & d_{2_f} &= 2 \text{ mm} \end{aligned}$$

Diferențele privind valorile lui d_1 , h^* au rezultat prin adoptarea unui $d_1 < d_{1_f}$, pentru a reduce inducția magnetică în această zonă (rezultînd o creștere a lui h^* , pentru a se respecta q_i), respectiv a lui h_o , pentru ca în aceste condiții să se obțină o valoare λ_{cr_f} cît mai apropiată de cea necesară ($\lambda_{cr} \approx 18,4$).

Din cele prezentate rezultă că programul de calcul elaborat permite determinarea dimensiunilor crestăturii în bune condiții.

CAPITOLUL VI.COMPORTAREA MOTOARELOR ASINCRONE IN DUBLA COLIVIE
TURNATE IN ALUMINIU PE PARCURSUL PROCESULUI DE PORNIRE.6.1. Considerații introductive.

Pe lângă realizarea mărimilor energetice, randamentul η și factorul de putere $\cos \varphi$, și de pornire, cuplul m_p și curentul i_p , mașina asincronă în dublă colivie turnată în aluminiu trebuie să prezinte și proprietatea de a asigura desfășurarea procesului de pornire în bune condițiuni, pînă la atingerea regimului normal de lucru.

După cum se știe³⁴, mașina asincronă în dublă colivie se caracterizează printr-o curbă a lui $M = f(s)$ care, în funcție de valoarea raportului α , prezintă o "gea", respectiv la o anumită alunecare s^* trece printr-un minim.

Condiția ca procesul de pornire să aibă continuitate este ca acest cuplu de pornire minim să fie mai mare decît cuplul de sarcină, adică $M_{p_{\min}} > M_s$.

Din acest motiv, rezultă că este necesară cunoașterea curbei $M = f(s)$, motorul dovedindu-se corespunzător numai dacă amintita condiție este satisfăcută.

Determinarea exactă a curbei cuplului prin calcul întîmpină însă reale dificultăți, deoarece în funcție de valoarea alunecării intervin, pe de o parte, o refulare mai mult sau mai puțin sensibilă a curentului din barele rotorice, iar pe de altă parte o anumită saturație a miezului, ambele fiind dependente de alunecarea cu care lucrează mașina.

Consecințele acestor fenomene sînt creșterea rezistenței R_2' și micșorarea reactanței X_2' , cu atît mai mult cu cît s este mai mare, respectiv cu creșterea componentei I_{10} a curentului statoric.

Variația rezistenței $R_2' = f(s)$ și a reactanței $X_2' = f(s)$ este însă relativ dificil de evaluat exact, necesitînd calcule numeroase, corespunzînd unor trepte de alunecare Δs mici, mai ales în intervalul $s = 1$ și $s = s_k$.

Pentru calculul curbei $M = f(s)$, cu o anumită aproximație dar suficient de apropiată de cea reală, voi folosi metoda propusă în literatură², descrisă în cele ce urmează.

6.2. Expresia practică a cuplului $M = f(s)$ a motorului asincron în dublă colivie².

Modul de variație a rezistenței $R'_2(s)$ și a reactanței $X'_2(s)$ corespunde variației factorilor $k_R(s)$, de creștere a rezistenței R'_{2n} , și $k_X(s)$, de micșorare a reactanței X'_{2n} , în funcție de creșterea alunecării peste valoarea s_n .

Funcțiile factorilor de mărire $k_R(s)$ și de micșorare $k_X(s)$, mai ales în cazul motorului în dublă colivie turnat în aluminiu (la care crestătura rotorică are o formă complexă) sînt însă foarte greu de stabilit exact.

Se demonstrează² că admiterea ipotezei că aceste funcții variază liniar conduce la rezultate relativ puțin diferite de cele reale. Curbele de variație respective, exacte și aproximative, sînt reprezentate în figurile 6.1.a și 6.1.b și confirmă, după cum se vede, afirmația de mai sus.

Admițînd ipoteza variației practic liniare a celor doi parametri în funcție de alunecare, ei pot fi exprimați sub formele :

$$R'_2(s) \approx a + b \cdot s \quad (6.1)$$

$$X'_2(s) \approx X'_{2n} - c(s - s_n) \quad (6.2)$$

Dreptele corespunzînd celor două ecuații de mai sus sînt trase cu linie întreruptă în figurile 6.1.a și 6.1.b.

Dacă se cunosc $R'_2(s) = R'_2(s_n) = R'_{2n}$ și $R'_2(s) = R'_2(1) = R'_{2p}$

(din calculul de proiectare sau din încercări) relația (6.1) duce la :

$$R'_{2n} = a + b \cdot s_n \quad (6.3)$$

$$R'_{2p} = a + b \quad (6.4)$$

Rezolvînd sistemul de ecuații (6.3), (6.4) rezultă că :

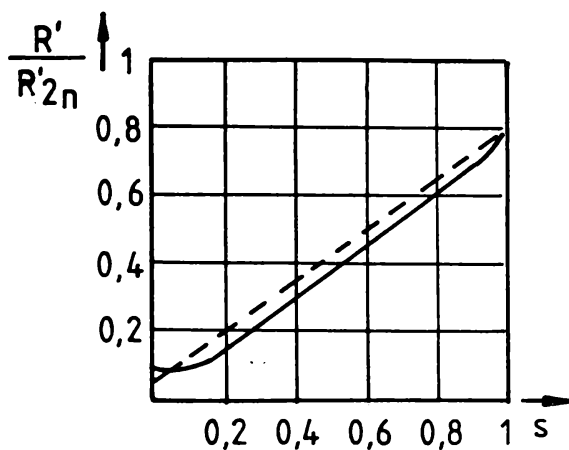


Figura 6.1.a. Modificarea rezistenței indusului cu alunecarea, exactă (—), respectiv aproximativă (---).

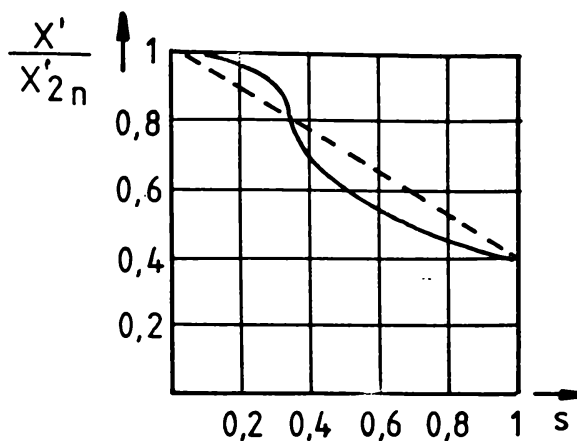


Figura 6.1.b. Variația reactanței indusului cu alunecarea, exactă (—), respectiv aproximativă (---).

$$a = \frac{R'_{2n} - R'_{2p} s_n}{1 - s_n} \quad (6.5)$$

$$b = \frac{R'_{2p} - R'_{2n}}{1 - s_n} \quad (6.6)$$

La fel, dacă se cunosc reactanțele $X'_2(s) = X'_2(s_n) = X'_{2n}$ și $X'_2(s) = X'_2(1) = X'_{2p}$, din (6.2) rezultă pentru constanta c valoarea

$$c = \frac{X'_{2n} - X'_{2p}}{1 - s_n} \quad (6.7)$$

Constantele a, b și c fiind cunoscute, precum și parametrii nominali R'_{2n} , X'_{2n} , s_n , cu relațiile (6.1) și (6.2) se pot calcula valorile parametrilor respectivi la orice alunecare s care interesează.

Fiind cunoscute în acest fel $R'_2(s)$ și $X'_2(s)$, expresia curbei cuplului pentru motoarele analizate se poate determina, în ipotezele admise, pornind de la expresia cunoscută a cuplului :

$$M = \frac{p \cdot m_1 U_1^2}{2\pi f_1} \cdot \frac{R_2'}{s} \frac{1}{(R_1 + C_1 \frac{R_2'}{s})^2 + (X_1 + C_1 X_2')^2} \quad (6.8)$$

Inlocuind în (6.8) pe R_2' și X_2' prin expresiile lor (6.1) și (6.2) rezultă succesiv :

$$\begin{aligned} M &= k \frac{\frac{a + bs}{s}}{\left[R_1 + C_1 \frac{(a + bs)}{s} \right]^2 + \left[X_1 + C_1 (X_{2n}' - c(s - s_n)) \right]^2} = \\ &= k \frac{\frac{a + bs}{s}}{\frac{\left[R_1 s + C_1 a + C_1 bs \right]^2}{s^2} + (X_1 + C_1 X_{2n}' - cC_1 s + C_1 cs_n)^2} = \\ &= k \frac{\frac{a + bs}{s}}{\frac{s(R_1 + C_1 b + aC_1)^2}{s^2} + \frac{s^2(X_1 + C_1 X_{2n}' - cC_1 s + C_1 cs_n)^2}{s^2}} = \\ &= k \frac{\frac{a + bs}{s}}{\frac{\left[s(R_1 + C_1 b) + aC_1 \right]^2 + s^2(X_1 + C_1 X_{2n}' - cC_1 s + C_1 cs_n)^2}{s^2}} = \\ &= k \frac{s(a + bs)}{\left[s(R_1 + C_1 b) + aC_1 \right]^2 + s^2(X_1 + C_1 X_{2n}' - cC_1 s + C_1 cs_n)^2} \end{aligned}$$

Neglijind termenul $cC_1 s_n$ (alunecarea nominală avînd o valoare foarte mică) se obține în final :

$$M = \frac{s(a + bs)k}{\left[(R_1 + bC_1)s + aC_1 \right]^2 + s^2 \left[(X_1 + C_1 X_{2n}') - cC_1 s \right]^2} \quad (6.9)$$

în care :

$$k = \frac{p \cdot m_1 \cdot U_1^2}{2\pi f_1} \quad (6.10)$$

iar a, b și c au valorile care rezultă cu relațiile (6.5), (6.6) și (6.7).

Dând diferite valori lui s între (0 - 1), cu relația (6.9) se poate determina curba cuplului motorului proiectat, care reflectă suficient de corect comportarea motorului în timpul pornirii.

6.3. Ordinogramă și program de calcul al curbei cuplului.

Pentru calculul curbei $M = f(s)$ pe baza relației (6.9) am elaborat ordinograma redată în Figura 6.2.

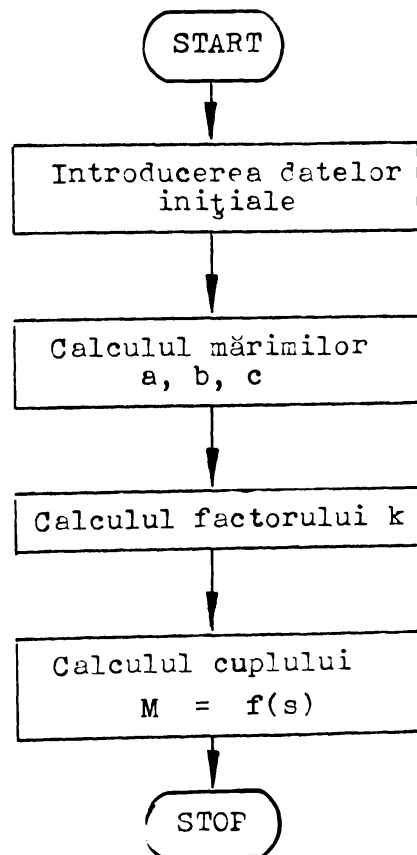


Figura 6.2. Ordinograma de calcul al curbei cuplului

Programul de calcul care corespunde acestei ordinograme este

redat în anexele A.4 și A.5, partea inițială.

Acest program de calcul l-am aplicat în cazul celor două motoare considerate și în cadrul capitolelor anterioare.

Pentru a obține rezultate cât mai corecte, valorile luate în considerare pentru alunecarea s le-am mărit în trepte $\Delta s = 0,04$.

6.4. Curbele $M = f(s)$ ale motoarelor de 15 kW, 750 rpm și 22 kW, 1000 rpm, obținute cu programul de calcul.

Datele inițiale introduse în calculator pentru motorul de 15 kW, 500 V (Δ) și 750 rpm, conform rezultatelor obținute anterior, au fost :

$$\begin{aligned} m_1 &= 3 & p &= 4 & U_1 &= 500 \text{ (V)} & f_1 &= 47 \text{ (Hz)} \\ X_{2n}' &= 12,82 \text{ (}\Omega\text{)} & R_{2n}' &= 1,6819 \text{ (}\Omega\text{)} & X_{2p}' &= 3,6883 \text{ (}\Omega\text{)} \\ R_{2p}' &= 5,4138 \text{ (}\Omega\text{)} & R_1 &= 1,1026 \text{ (}\Omega\text{)} & X_1 &= 2,9276 \text{ (}\Omega\text{)} \\ C_1 &= 1,048 & s_n &= 0,0444 \end{aligned}$$

Mărimile a, b și c s-au calculat conform relațiilor (6.5), (6.6) și (6.7) iar factorul k cu relația (6.10).

La fel am procedat și pentru motorul de 22 kW, 1000 rpm, 500 V (Δ), cu deosebirea că s-au introdus valorile datelor inițiale corespunzătoare și anume :

$$\begin{aligned} m_1 &= 3 & p &= 3 & U_1 &= 500 \text{ (V)} & f_1 &= 47 \text{ (Hz)} \\ R_1 &= 0,6694 \text{ (}\Omega\text{)} & X_1 &= 1,6838 \text{ (}\Omega\text{)} & R_{2n}' &= 1,067 \text{ (}\Omega\text{)} \\ X_{2n}' &= 10,2634 \text{ (}\Omega\text{)} & R_{2p}' &= 3,32 \text{ (}\Omega\text{)} & X_{2p}' &= 2,5538 \text{ (}\Omega\text{)} \\ C_1 &= 1,026 & s_n &= 0,045 \end{aligned}$$

Curbele cuplurilor celor două motoare care au rezultat sînt sintetizate în Anexa A.4 pentru motorul de 15 kW, 750 rpm, și în Anexa A.5 pentru motorul de 22 kW, 1000 rpm.

Pe baza rezultatelor înscrise în aceste anexe, am reprezentat în figurile 6.3 și 6.4 curbele $M = f(s)$ obținute pentru cele două motoare.

Se observă că motorul de 15 kW, 750 rpm se caracterizează, în ipotezele simplificatoare admise, printr-o curbă a cuplului permanent urcătoare, în zona $s = 0,15 - 0,25$ variațiile valorice ale cu-

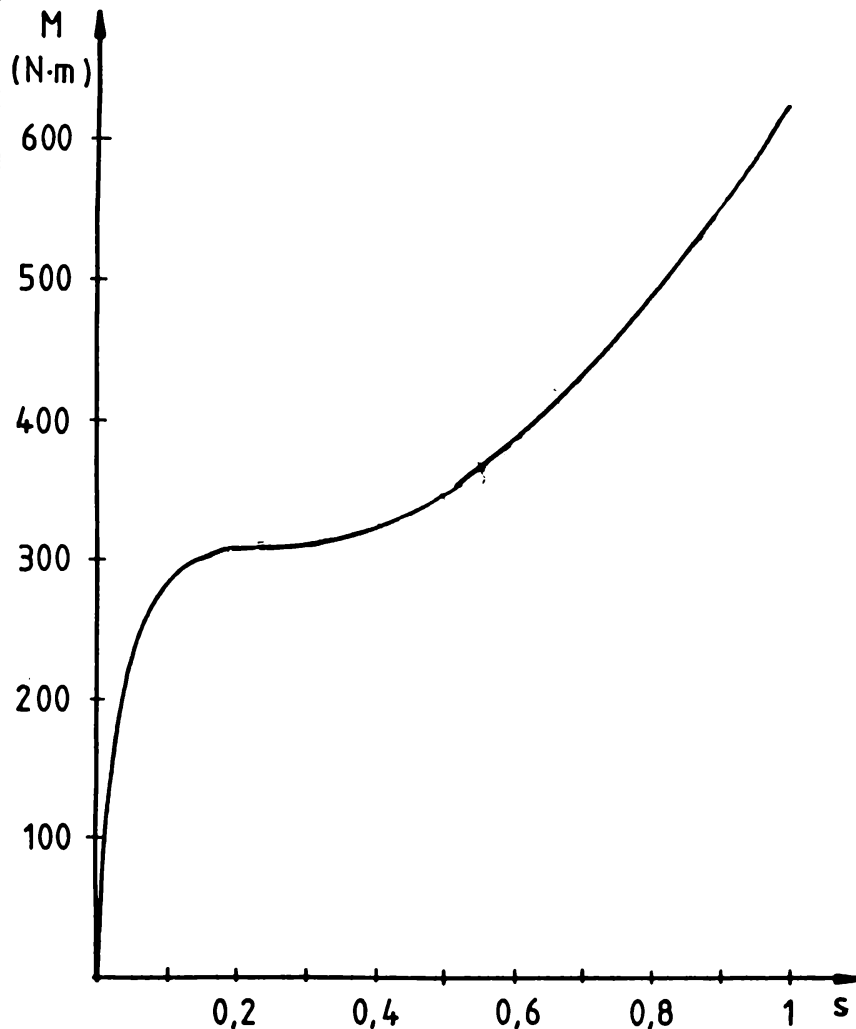


Figura 6.3. Curba $M = f(s)$ obținută pentru motorul de 15 kW, 750 rpm.

plului M fiind însă extrem de mici. La un calcul riguros exact al factorilor $k_R(s)$ și $k_X(s)$, cu toată probabilitatea, în acest interval se manifestă șeaua curbei cuplului, care ar rezulta însă ne-semnificativă.

La motorul de 22 kW și 1000 rpm, în schimb, se evidențiază o ușoară șea, în domeniul $s = 0,14 - 0,28$, curba cuplului trecând printr-un minim $M_{p_{\min}} = 309,96 \text{ N}\cdot\text{m}$, la alunecarea $s = 0,23$, după care curba cuplului crește continuu până la $M_{p(s=1)} = 788,87 \text{ N}\cdot\text{m}$.

Cuplul de răsturnare, $M_k = 312,51 \text{ N}\cdot\text{m}$, are loc la alunecarea $s_k = 0,14$.

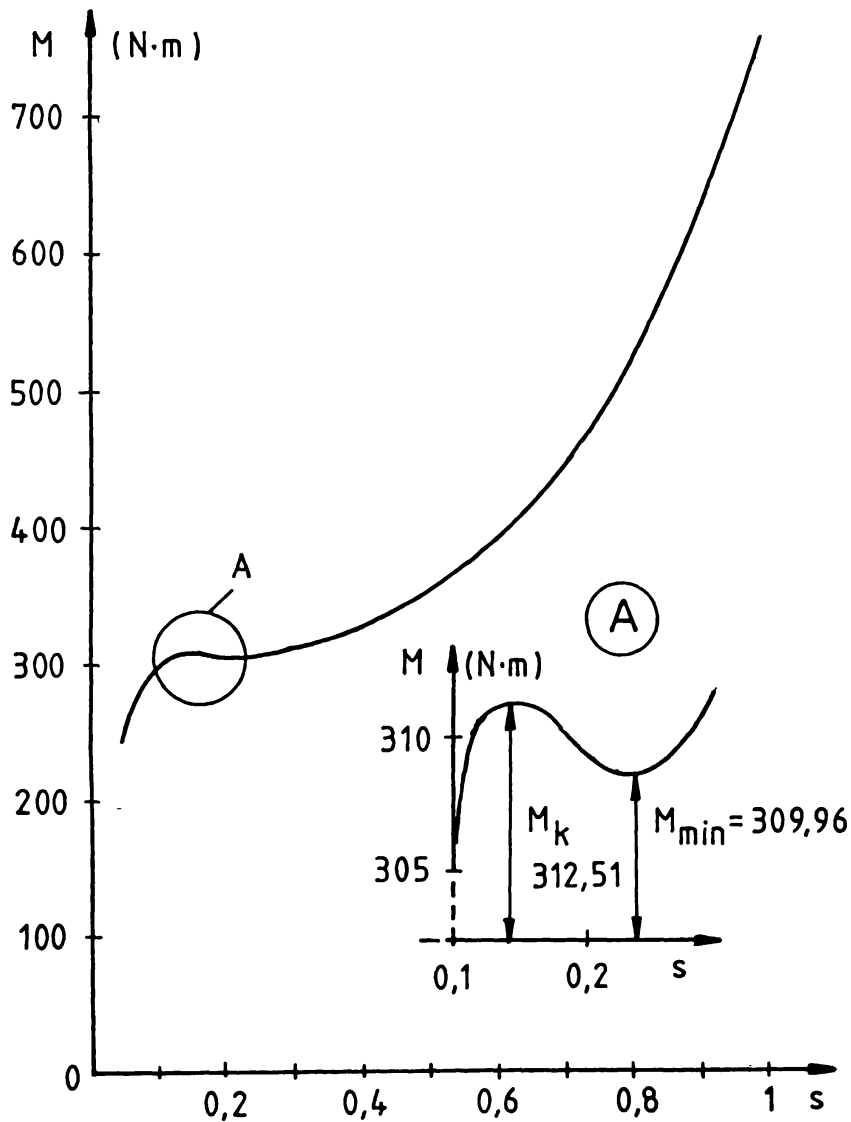


Figura 6.4. Curba $M = f(s)$ obținută pentru motorul de 22 kW, 500 V (Δ), 1000 rpm.

6.5. Interpretarea rezultatelor obținute.

Cuplurile nominale ale celor două motoare sînt $M_{n(15)} = 200$ N·m, corespunzător alunecării $s_n = 0,0444$, pentru motorul de 15 kW și $M_{n(22)} = 235,6$ N·m, corespunzător lui $s_n = 0,045$, pentru motorul de 22 kW.

Curbele $M = f(s)$ obținute și reprezentate în figurile 6.3 și 6.4 arată că în întreg intervalul $s = 1 \div s_n$, cuoul celor două

motoare este superior celui nominal, procesul de pornire fiind asigurat în bune condițiuni. Seaua curbei cuplului care intervine la motorul de 22 kW nu este periculoasă întrucît cuplul relativ $m_{p_{min}} = 309,96/235,6 \approx 1,31 > 1$ cu circa 30%.

Este adevărat că cele două curbe $M = f(s)$ stabilite, datorită ipotezelor admise privind variația factorilor k_R și k_X cu alunecarea, nu sînt riguros exacte.

Deoarece aproximațiile introduse prin ipotezele amintite sînt neesențiale (a se vedea figurile 6.1.a și b), curbele reale ale cuplului, atît pentru motorul de 15 kW cît și pentru cel de 22 kW, sînt însă foarte apropiate ca formă de cele stabilite mai sus. Concluzia este că proprietatea enunțată privind asigurarea unei porniri fără probleme este valabilă, ceea ce demonstrează că motoarele proiectate și executate au fost bine dimensionate, respectiv factorul α a fost bine ales.

Cuplurile relative de pornire $m_{p(15)} = 3,19$ și $m_{p(22)} = 3,3$ arată că pornirea ambelor motoare poate fi realizată, la nevoie, atît cu un autotransformator auxiliar, cît și cu un comutator stea-triunghi.

CAPITOLUL VII.CONCLUZII.

Studiul executat privind comportarea motoarelor asincrone în dublă colivie, caracterizate prin mărimi de pornire pretențioase sau obișnuite, a condus la mai multe concluzii practice, pe care le consider utile pentru proiectarea rațională a motoarelor de tipul respectiv. Ele se pot sintetiza în următoarele :

1) Motoarele asincrone în dublă colivie la care se impun mărimi de pornire pretențioase se caracterizează, în compensație, printr-un randament nominal, factor de putere nominal și cuplu de răsturnare inferioare în raport cu motoarele de serie corespunzătoare. Explicația constă în rezistența rotorică și reactanța de dispersie rotorică, superioare (în vederea obținerii mărimilor de pornire mai pretențioase) față de cele ale motoarelor obișnuite corespunzătoare.

Rezultă că, pentru obținerea mărimilor de pornire impuse, la fixarea datelor de proiectare, ele trebuie admise mai mici decât ale motoarelor obișnuite având aceleași date (P_n , U_{1n} , n). Gradul în care trebuie reduse aceste mărimi este precizat în cadrul lucrării.

2) Rezistența de pornire R'_{2p} și reactanța nominală X'_{2n} la acest tip de motoare (cu mărimi de pornire pretențioase) sînt sensibil mai mari decât la motoarele de serie ; valoarea lor este cu atît mai mare cu cît indicele de calitate al pornirii $q_p = m_p/i_p$ (cuplul de pornire/curentul de pornire) este mai pretențios, cu alte cuvinte, cu cît cuplul m_p este mai mare, respectiv curentul de pornire este mai mic. Dintre aceste două mărimi, o influență mai mare asupra creșterii rezistenței R'_{2p} și a reactanței X'_{2n} o are valoarea curentului relativ de pornire i_p , fapt demonstrat în cadrul studiului cuprins în teză.

3) Dacă mărimile de pornire sînt exagerat de pretențioase intervin reale dificultăți în proiectarea mașinii astfel ca să se asigure solicitări electrice și magnetice normale, creștăturile și dinții rotorici să aibă dimensiuni realizabile, randamentul și fac-

torul de putere să rezulte satisfăcători etc.

În cazul în care factorul g_p impus este deosebit de pretențios, se poate ajunge chiar la situația ca motorul să nu poată fi realizat, în principal datorită înălțimii exagerat de mari care rezultă pentru creștăturile din rotor.

O condiție necesară pentru a se putea dimensiona rațional un motor cu mărimi de pornire pretențioase constă prin urmare în fixarea, în tema de proiectare, a unui cuplu de pornire m_p și a unui curent de pornire i_p la nivelul efectiv necesar.

4) Principalele particularități de proiectare concretă a motoarelor asincrone cu dublă colivie și cu mărimi de pornire pretențioase, care au rezultat în urma studiului efectuat, constau în :

a) Dimensionarea mașinii cu lungimea L mai mare și diametrul D mai mic decât la motoarele obișnuite (de serie). Propunerile privind gradul de modificare a acestor dimensiuni au fost stabilite în Capitolul III.

b) Pentru a avea solicitări magnetice și electrice (B_δ , j , A) admisibile, simultan cu creșterea lungimii L , numărul de spire N în stator trebuie ales mai mic.

Raportul dintre numărul de spire ale motoarelor cu mărimi de pornire pretențioase și cel al motoarelor obișnuite corespondente, recomandabil, este stabilit în același Capitol III.

c) Alunecarea nominală s_n trebuie să fie adoptată de o valoare sporită, numai în acest fel fiind posibilă obținerea unor dimensiuni principale (diametrul D , lungimea L) realiste, rotorul realizabil din punct de vedere tehnologic, parametrii rotorici cât mai apropiați de cei necesari, fără a forța solicitarea electromagnetice a mașinii, etc.

d) Pentru a putea proiecta motorul astfel ca să aibă o comportare cât mai mulțumitoare, este foarte importantă alegerea potrivită a raportului dintre secțiunea circulară din partea superioară a creștăturii rotorice (a "creștăturii de pornire") și secțiunea ovală a părții sale inferioare (a "creștăturii de lucru"). Acest raport, notat în lucrare cu α , influențează esențial valoarea parametrilor rotorici necesari, realizarea în condiții cât mai bune a mărimilor funcționale și de pornire impuse, precum și obținerea unei curbe convenabile a cuplului.

Aceste concluzii, cu deducerea lor și sub aspect cantitativ, rezultă în urma studiului dezvoltat în finalul capitolului II și

în capitolul III.

e) Calculul parametrilor rotorici cu relațiile din literatură, la motoarele asincrone în dublă colivie turnate în aluminiu, conduce la valori mai mult sau mai puțin diferite de cele reale, afirmația fiind dovedită de rezultatele experimentale prezentate în Capitolul IV.

Am dedus că motivul care determină această situație este faptul că aceste motoare nu sînt de fapt în dublă colivie, care pot fi considerate conectate în paralel, ci motoare cu o singură colivie, barele (crestăturile sale) avînd o formă particulară complexă.

În acest context, am studiat (Capitolul IV) modul în care, prin considerarea unei bare (crestături) echivalente din punctul de vedere al dispersiei rotorice cu aceea a barei reale, este posibilă obținerea unor valori ale parametrilor rotorici cît mai apropiate de cele existente în realitate.

Admițînd în acest sens că crestătura rotorică reală poate fi înlocuită cu o crestătură echivalentă formată dintr-o parte circulară - în partea superioară - și o parte în T în partea inferioară și punînd condiția ca permeanța sa specifică să fie egală cu aceea a crestăturii reale, am reușit să stabilesc o relație pentru permeanța specifică λ_{cr2} și pentru reactanța X'_{2n} care asigură obținerea unei valori a lui X'_{2n} practic corectă.

Cunoscînd permeanța specifică λ_{cr2} corespunzătoare și deducînd o relație care exprimă aproximativ secțiunea de bară parcursă de curent la pornire ($s = 1$), am dedus și relațiile de calcul ale parametrilor R'_{2p} , X'_{2p} și R'_{2n} valabile în cazul crestăturii echivalente considerate.

f) Relațiile propuse pentru calculul parametrilor rotorici, folosind echivalarea menționată a crestăturii rotorice, se dovedește a fi corecte, lucru confirmat în urma comparării valorilor obținute prin calcul, cu ajutorul acestor relații, și valorile obținute experimental (Capitolul IV).

g) Dacă raportul α dintre q_e și q_i , secțiunile părții circulare și a părții ovale a barelor, este corect adoptat, conform celor deduse în §3.5, procesul de pornire a motoarelor în dublă colivie cu mărimi de pornire pretențioase și rotor turnat în aluminiu rezultă corespunzător. Acest lucru a rezultat convingător din ana-

liza prezentată în Capitolul VI.

În cadrul tezei, pentru calculul de dimensionare a creștăturii rotorice după metoda propusă și pentru stabilirea curbei cuplului am elaborat câte o ordinogramă și un program de calcul (Capitolul IV, respectiv VI).

În urma aplicării acestor programe de calcul în cazul a două motoare (unul de 15 kW, 750 rpm și al doilea de 22 kW, 1000 rpm), ele s-au dovedit a fi întrutotul corespunzătoare.

Pentru a ușura aplicarea rezultatelor obținute în urma studiului dezvoltat, în teză am elaborat, în Capitolul V, în întregime, metodica de proiectare a motorului în dublă colivie turnat în aluminiu, bazată pe considerarea înfășurării rotorice ca o colivie simplă, avînd barele (creștăturile) de o formă complexă, particulară, înlocuită cu forma echivalentă propusă.

Metodica poate fi folosită și pentru proiectarea mai corectă a motoarelor în dublă colivie turnate în aluminiu avînd cuplul de pornire m_p și curentul de pornire i_p de valori obișnuite. Deosebirea față de cazul motoarelor cu mărimi de pornire pretențioase constă în aceea că dimensiunile principale, diametrul D și lungimea L , alunecarea s_n și numărul de spire N sînt de valori obișnuite, respectiv factorul a are o valoare mai mică.

Deoarece motoarele cu mărimi de pornire uzuale se construiesc obișnuit cu bare înalte în rotor, rezultatele obținute în prezenta lucrare își găsesc aplicabilitate însă mai ales în cazul motoarelor asincrone turnate în aluminiu cu mărimi de pornire pretențioase.

BIBLIOGRAFIE

1. Bălă, C., Mașini electrice, Editura didactică și pedagogică, București, 1982.
2. Babescu, M., Asupra unei metode de determinare a caracteristicilor mecanice la motoare asincrone trifazate, Vol.COMEP'83, Sesiunea de comunicări, Pitești, 12-14 mai 1983.
3. Câmpeanu, A., Mașini electrice, Editura Scrisul românesc, Craiova, 1977.
4. Câmpeanu, A., Mașini electrice, Editura Scrisul românesc, Craiova, 1988.
5. Cioc, I., Bichir, N., Cristea, N., Mașini electrice, Indrumător de proiectare, vol.II, Editura Scrisul românesc, Craiova, 1981.
6. Danielevici, Ia.B., Dombrovski, V.V., Kazovski, E.Ia., Parametrii mașinilor de curent alternativ, Traducere din limba rusă, Editura tehnică, București, 1968.
7. Diamant, P., A new approach to multi-segment ed. rotor slot design for induction motors, IEEE Trans.on PAS (91), nr.6, nov-dec. 1972, p.2383-2389.
8. Dordea, T., Mașini electrice, Editura didactică și pedagogică, București, 1977.
9. Dordea, T., Scurtarea timpului la proiectarea asistată de calculator a mașinilor de inducție cu dublă colivie, Proceedings of the First International Conference on Electrical Machines and drive systems, Eforie Nord, Romania, 16-17 sept. 1986.
10. Dordea T., Dordea, T.P., Ersatzläuferimpedanz einer Induktionsmaschine mit vielfachen Käfig und in den selben nuten untergebracht stäben, Editura Academiei RSR, Tom 29, nr.2, 1984.
11. Dordea, T., Novac, I., Protocol contract 79/1983, IPT-EMT.
12. Dordea, T., Proiectarea și construcția mașinilor electrice, Partea a I-a, Litografia IPTVT, Timișoara, 1974.
13. Drăgănescu, O.Gh., Incercările mașinilor electrice rotative, Editura tehnică, București, 1987.
14. Fransua, A. și alții, Mașini și acționări electrice, Editura didactică și pedagogică, București, 1967.
15. Fransua, A., Magureanu, R., Mașini și acționări electrice, Editura tehnică, București, 1936.

16. Gray, A., Principles and Practice of Electrical Engineering, Mc.Graw-Hill Book Company, Inc., New-York, 1962.
17. Galan, N., Ghiță, C., Cistelecă, M., Mașini electrice, Editura didactică și pedagogică, București, 1981.
18. Jordan, H.E., Synthesis of double-cage induction motor design, Trans.AIEE PAS-78, nr.44, 1959.
19. Klingshirn, E.A., Jordan, H.E., Simulation of Polyphase Induction Machines with deep rotor bars, Trans.IEEE vol.PAS-89, nr. 6, 1970.
20. Nicolaide, A., Mașini electrice. Teorie, proiectare, vol.I, II, Editura Scrisul românesc, Craiova, 1975.
21. Novac, I., Construcția, funcționarea și proiectarea motoarelor asincrone în dublă colivie
22. Novac, I., și alții, Mașini și acționări electrice, Editura didactică și pedagogică, București, 1982.
23. Novac, I., Centea, O., Mașini electrice, Indrumător de proiectare, Litografia I.P.T., Timișoara, 1956.
24. Novac, I., Asupra dimensionării motoarelor de inducție în dublă colivie când se impun M_p și I_p , Bul.șt.și tehn. al IPTVT, Seria electrotehnică, Tom 25(39), 1980.
25. Novac, I., Considerații asupra cuplului de răsturnare al motoarelor asincrone în dublă colivie, Bul.șt.și tehn.al IPTVT, Seria electrotehnică, Tom 30(44), 1,2, 1985.
26. Novac, I., Considerații asupra dimensionării motoarelor de inducție în dublă colivie la care se impun randamentul și factorul de putere, Bul.șt.și tehn.al IPTVT, Seria electrotehnică, Tom 25(39), 1, 1980.
27. Novac, I., Particularități ale dimensionării motoarelor de inducție în dublă colivie cu cuplu de pornire mărit și curent de pornire scăzut, CNEE, vol.IV, 1982.
28. Novac, I., Probleme privind dimensionarea motoarelor asincrone cu mărimi de pornire pretențioase pentru asigurarea solicitării normale a mașinii, CNEE, vol.IV, 1984.
29. Novac, I., Analiza modului de concepere a motoarelor asincrone, caracterizate prin mărimi de pornire exigente, Bul.șt.și tehn. al IPTVT, Seria electrotehnică, Tom 29(43), 1984.
30. Nicolescu, E., Aspecte ale proiectării seriilor unitare de motoare asincrone, Electrotehnica, 16, nr.6, 1963.

31. Nurnberg, W., Die Asynchronmaschine, Springer Verlag, Berlin, 1963.
32. Postnikov, I.M., Proiectarea maşinilor electrice, Editura energetică de stat
33. Richter, R., Maşini electrice, vol.I, Editura tehnică, Bucureşti, 1960.
34. Richter, R., Maşini electrice, vol.IV, Editura tehnică, Bucureşti, 1960.
35. Apellbaum, I., Determination of Slot Dimensions of Double Squirell-cage and deep Bar Rotors, Trans.IEEE, PAS-pl, nr.4., p.1513-1518.
36. Tatu, Ch., Optimizarea proiectării maşinii de inducţie în dublă colivie prin metode de programare neliniare, Teză de doctorat, 1979.
37. Vinogradov, N.V., Gorianov, F.S., Serghiev, P.S., Proiectarea maşinilor electrice, vol.II, Redactat de Serghiev P.S., Editura energetică de stat, Bucureşti, 1953.

