

MINISTERUL EDUCAȚIEI SI INVATAMINTULUI
INSTITUTUL POLITEHNIC " TRAIAN VUIA " TIMISOARA

FACULTATEA DE ELECTROTEHNICA

Ing. GHEORGHE TATU

OPTIMIZAREA PROIECTARII MASINII DE INDUCTIE, CU ROTOR
IN DUBLA COLIVIE, PRIN METODE DE PROGRAMARE NELINIARE

- Teza de doctorat -

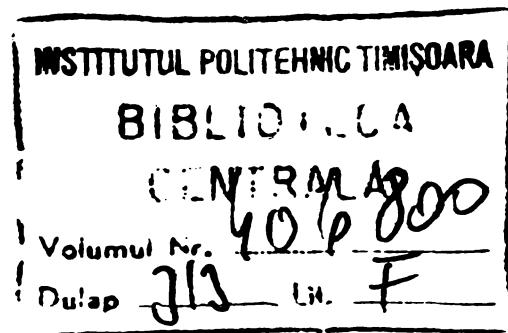
CONDUCATOR STIINTIFIC

Prof.dr.ing. IOAN NOVAC

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

T I M I S O A R A

1 9 7 9



C U P R I N S

	pag.
CUVINT INAINTE	9
CAP.A INTRODUCERE	11
1. Punerea problemei	11
2. Prezentarea capitolelor cu sublinierea contribuțiilor aduse de autor.	11
 CAP.B PREZENTAREA SI ANALIZA CRITICA A LITERATURII.	 18
1. Proiectarea mașinilor de inducție în sistemul actual	18
2. Analiza metodelor de optimizare cunoscute.	21
2.1. Optimizarea geometriei transversale .	22
2.2. Optimizarea înfășurărilor	23
2.3. Metode cvasigenerale de optimizare. .	25
 CAP.C METODE DE OPTIMIZARI PARTIALE ALE MASINII . .	 29
1. Optimizarea pasului înfășurării (Y_{opt}). .	29
1.1. Rezolvarea numerică	29
1.2. Utilizarea practică a rezultatelor. .	36
2. Metode de optimizarea geometriei longitudinale	39
2.1. Referitor noțiuni de statistică matematici.	40
2.2. Prezentarea etapelor metodei stohastice extrapolative.	41
2.3. Formule de extrapolare.	44
2.3.1. Rezistențe	44
2.3.2. Reactanțe	45
2.3.3. Parametrii regimului de mers în scurt circuit	48

2.3.4. Parametrii circuitului de magnetizare	49
2.4. Calculul costurilor și economiilor	55
2.5. Prelucrarea datelor obținute la probele de tip	56
2.6. Prelucrarea probelor de serie.	63
2.7. Calculul parametrilor fizici pentru noua variantă.	65
2.8. Calculul criteriilor și a parametrilor modula în noi variante precum și economiile aferente.	66
2.9. Calculul variantei optime.	67
 CAP.D PROGRAMAREA NELINIARA. METODE SI TEHNICI SPECIFICE	69
Considerații generale.	69
1. Metode de programare neliniară fără restricții	70
1.1. Condițiile de existență a extremumului liber	70
1.2. Metode numerice pentru găsirea minimului fără restricții.	74
1.2.1. Metode fără evaluarea derivatei . . .	74
1.2.1.1. Metode aleatoare de căutare . . .	74
1.2.1.2. Metoda căutării unidimensionale .	75
1.2.1.2.1. Interpolarea pătratică	79
1.2.1.2.2. Algoritmul lui Brent	83
1.2.1.2.3. Tehnica Fibonacci	84
1.2.1.3.- Algoritmi pentru minimizarea	88
1.2.1.7. funcțiilor neliniare de n variabile, fără restricții. . . .	88
1.2.1.8. Algoritmul lui POWELL	88
1.2.2. Metode cu evaluarea derivatei . . .	91
1.2.2.1.- Diversi algoritmi utilizînd metode de gradient pentru minimizarea	
1.2.2.7 de gradient pentru minimizarea funcțiilor neliniare de n variabile, fără restricții	91

	pag.
1.2.2.8. Algoritmul lui Davidon-Fletcher Powell (D.F.P.)	91
2. Metode de programare nelineară cu re- stricții	96
2.1. Extremumuri legate.	97
2.1.1. Conuri	97
2.1.2. Condițiile KUHN-TUCKER. Interpre- tare geometrică	98
2.1.3. Enunțarea algebrică a condițiilor KUHN-TUCKER	101
2.2. Metode numerice pentru găsirea mini- mului cu restricții	104
2.2.1. Metode directe ale programării ne- liniare, cu restricții	105
2.2.1.1. - Diverși algoritmi din catego- ria met. directe	105
2.2.1.6. Algoritmul COMPLEX a lui J.M. Box	105
2.2.2. Metode indirecte de programare ne- liniară cu restricții	108
2.2.2.1. Tehnici bazate pe funcții de pe- nalizare	108
2.2.2.2. Metoda SUMT a lui Fiacco - Mc. Cormick	110
3. Analiza comparativă a eficienței algorit- milor	113
 CAP.E MODELUL MATEMATIC	 115
1. Proiectul initial al motorului (PRIMO) .	115
1.1. Descrierea succintă a metodei de proiectare și a programului PRIMO .	116
1.1.1. Datele fundamentale ale mașinii .	116
1.1.1.1. Date electrice	116
1.1.1.2. Date constructive	116

	pag.
1.1.1.3. Datele bobinajului	117
1.1.2. Calculul curentului de magnetiza- re	117
1.1.3. Calculul curentului de scurt-cir- cuit	117
1.1.4. Determinarea caracteristicilor de mers în gol	117
1.1.5. Determinarea rezistențelor și re- actanțelor ținând cont de refula- rea curentului în colivia rotorii- că și de saturarea căilor de dis- persie la pornire	117
1.1.6. Calcularea parametrilor de porni- re și de regim	118
1.2. Schema logică bloc a programului PRIMO	118
1.3. Definirea unui nou tip de creștătu- ră pentru colivia de lucru a motoru- lui cu dublă colivie	118
2. Elaborarea funcției $F(Y)$ și a funcțiilor $g_j(Y)$	125
2.1. Alegerea variabilelor independente..	126
2.2. Funcția obiectiv	128
2.3. Alegerea restricțiilor și formula- rea lor matematică	131
2.4. Exprimarea parametrilor fizici în funcție de Y	138
2.4.1. Subprogram pentru determinarea lui I_μ (MAGNET)	143
2.4.2. Subrutină pentru determinarea geom. transversale	148

CAP.F PROGRAMUL DE OPTIMIZARE PROPRIUZIS.	152
1. Studiul și alegerea metodelor de optimizare	152
1.1. Formularea generală a problemei de optimizare în programarea matematică	152
1.2. Stabilirea algoritmilor și justificarea alegerii lor.	153
1.2.1. Metoda de căutare aleatoare . . .	156
1.2.1.1. Metoda COMPLEX	157
1.2.2. Metoda SUMT	158
1.2.2.1. Algoritmul POWELL	160
2. Descrierea și utilizarea programelor . .	160
2.1. Programarea metodei ALEATOR	160
2.1.1. Programul principal	160
2.1.2. Subprogramele metodei ALEATOR . .	162
2.2. Programarea metodei COMPLEX	162
2.2.1. Programul principal	162
2.2.2. Subprogramele metodei COMPLEX . .	164
2.3. Programarea metodei SUMT prin algoritmul POWELL	165
2.3.1. Programul principal	165
2.3.2. Subprogramul POWELL	167
2.3.3. Subprogramul MINIM	169
2.3.4. Subprogramul FUNC	173
3. Analiza și interpretarea rezultatelor. .	175
 CAP.G UTILIZAREA PRACTICA A METODEI DE OPTIMIZARE ELABORATE	180
1. Aplicarea metodei de optimizare elaborate pe un caz concret	180
1.1. Domeniul de variație a lui Y . . .	182

1.2. Constante și pseudiconstante ce intră în expresiile parametrilor fizici	183
1.3. Datele motorului inițial	186
1.4. Tabele comparative cuprinzînd valoările lui Y și parametrii principali ai mașinii în varianta inițială și varianta optimizată	189
1.5. Extrase din listinguri	190
1.6. Tabelul nr. 6 cu variația lui Y și F(Y) precum și reprezentarea grafică	202
1.7. Desenează tole stator și rotor, desen de gabarit, fige de calcul pentru varianta inițială și pentru varianta optimizată	204
 2. Rezultate ale încercării prototipului . .	211
2.1. Buletin ICPE	211
2.2. Tabel comparativ al valorilor principalilor parametrii, calculate și respectiv măsurate	220
 CAP.H EFICIENȚA ECONOMICA, CONSIDERATII SI CONCLUZII FINALE	221
1. Eficiența	221
2. Considerații și concluzii finale	222
 BIBLIOGRAFIE	224
 ANEXE	

ANEXE

	Nr. pag.
Anexa 1 - Schema logică a programului Y optim . . .	4
Anexa 2 - Listingul (tab.nr.1) conținând valorile lui Y,Z și e	4
Anexa 3 - Curbele de variație ale lui Y și e . . .	2
Anexa 4 - Listingul (tab.nr.2) conținând intervalele $Z_{j,q}$ în care Y se menține constant .	4
Anexa 5 - Calcul economic pentru Y optim aplicat la un gabarit de motoare.	1
Anexa 6 - Schema logică bloc a programului de optimizare longitudinală	3
Anexa 7 - Calcul economic la metoda de optimizare longitudinală	2
Anexa 8 - Schema logică bloc a programului PRIMO.	6
Anexa 9 - Explicitarea relațiilor pentru funcția obiectiv	8
Anexa 10 - Explicitarea relațiilor parametrilor fizici	17
Anexa 11 - Tabelul Nr.4 conținând valorile: $p_{sj} = f(B_{sj})$ și $P_{sz} = f(B_{sz})$	1
Anexa 12 - Schema logică a subprogramului MAGNET .	5
Anexa 13 - Schema logică a programului ALEATOR . .	7
Anexa 14 - Schema logică a metodei SUMT	2
Anexa 15 - Schema logică a subprogramului POWELL .	5
Anexa 16 - Schema logică a subprogramului MINIM ..	11
Anexa 17 - Schema logică a subprogramului COMPLEX.	7
Anexa 18 - Schema logică a subroutinei FUNC	1

CUVINT ÎNAINTE

Una din sarcinile economice puse cu consecvență de conducerea partidului în fața organizațiilor de partid, a comuniștilor, a tuturor oamenilor muncii este reducerea substanțială a cheltuielilor materiale de producție.

Această problemă a devenit un imperativ al activității tuturor colectivelor de muncă, în interesul dezvoltării țării, al creșterii bunăstării poporului nostru, stringenta ei actualitate fiind determinată de două cauze esențiale.

In primul rînd, pentru că aşa cum se cunoaște, dispunem de resurse materiale și energetice limitate. Ori, în condițiile crizei mondiale de materii prime și energie, economia noastră face eforturi deosebite pentru a importa, la prețuri tot mai ridicăte, deci utilizând importante fonduri valutare, ceea ce este strict necesar producției. De aceea, orice economii la materiile prime și resursele energetice procurate din import sau la cele din producția internă, precum și valorificarea lor superioară, creează posibilități de utilizare tot mai eficientă a fondurilor valutare, de creștere a producției cu resursele materiale de care dispunem.

In al doilea rînd, pentru că volumul cheltuielilor materiale influențează nemijlocit valoarea producției nete realizate în fiecare întreprindere - aceasta fiind indicatorul de bază al comensurării eficienței activității productive în condițiile nouui mecanism economico-financiar. Orice acțiune de diminuare a cheltuielilor materiale se reflectă direct în creșterea valoii producției nete.

Sporirea valoii producției nete în fiecare întreprindere înseamnă, la scara întregii economii, creșterea venitului național, principala sursă de dezvoltare continuă a economiei naționale și de creștere a nivelului de trai al poporului.

In acest context, principalele direcții de acțiune în vederea utilizării cu maximă economicitate a resurselor, materiale și energetice sunt :

- înnoirea și reproiectarea produselor;
- promovarea tehnologiilor noi, moderne;
- recuperarea integrală a resurselor materiale și energetice secundare și valorificarea lor superioară în producție.

Innoirea și reproiectarea produselor este cea mai importantă cale prin care se pot realiza economii.

Esențial este ca termenele prevăzute în programele de assimilare să fie riguros respectate, acordîndu-se maximă atenție în faza de concepție atât îmbunătățirii parametrilor tehnico-funcționali, cât și realizării unor construcții ugoare, pe bază de elemente tipizate, simplificîndu-se și micșorîndu-se dimensiunile reperelor și subansamblelor și bineînțeleș extinzîndu-se utilizarea materialelor înlocuitoare, avantajoase din punct de vedere tehnico-economic și care se bazează îndeosebi pe materii prime indigene.

*

* * *

Autorul consideră, în contextul ideilor expuse mai înainte, că prezenta lucrare se încadrează organic în ansamblul de preocupări majore de utilizare judicioasă, superioară, a resurselor materiale de căre dispune economia noastră, asigurînd concomitent produse, în sprijin motoare electrice, de calitate superioară, cu parametrii funcționali superiori, competitive pe piață internațională, cunoscînd fiind faptul că peste 70 % din producția întreprinderii Electromotor Timișoara, unde autorul își desfășoară activitatea, este destinată exportului.

Lucrarea constituie îmbinarea experienței de aproape 25 ani în fabricația mașinilor electrice cu cele mai noi metode matematice, obținîndu-se un program de proiectare optimală, cu minimum de costuri, a motoarelor de inducție, pentru o etapă determinată a nivelului materialelor active și electroizolante.

CAP. A. INTRODUCERE

1. Punerea problemei

Principalele două pîrghii care concură nemijlocit la ridicarea continuă a nivelului de trai al celor ce muncesc, sînt, după cum se știe, creșterea necontenită a productivității muncii și reducerea mai accentuată a cheltuielilor de producție, în principal, a cheltuielilor materiale concomitent cu îmbunătățirea performanțelor produselor.

In acest context, autorul își propune în lucrare să fundamenteze din punct de vedere teoretic și să verifice practic metode foarte eficiente de proiectare a mașinilor electrice de inductie, în esență a motorului cu rotor în dublă colivie, care apelează la unele noi domenii ale matematicii și la valențele multiple ale ordinatoarelor.

Pornind de la faptul că metodicele de proiectare clasice, pornind de la Arnold și pînă în zilele noastre s-au perfecționat continuu, verificîndu-se cu o bună precizie pe prototipuri la platforma de încercări, autorul nu și-a propus, în principal, să modifice sau să corecteze, decît cu unele excepții, relațiile de dimensionare ale mașinii sau pe cele de calculul parametrilor electromecanici.

Obiectivul primordial al lucrării este acela de a elabora metode originale de proiectare optimală a masinii de inductie.

Se utilizează în principal „unealta matematică” a vectorilor n^n dimensionali și a programării neliniare pentru determinarea „extremum-urilor legate” ale unor funcții de n variabile.

2. Prezentarea capitolelor cu sublinierea contribuțiilor aduse de autor.

Cap.A. Introducere. Punerea problemei.

Cap.B. Prezentarea și analiza critică a literaturii.

1. Proiectarea mașinilor de inductie în sistemul actual.

2. Metode cunoscute de dimensionare optimizată a mașinii de inducție.

2.1. Metode de optimizare a geometriei transversale.

2.2. Metode de optimizare a înfășurărilor.

2.3. Metode de optimizare cvasi-generale.

CAP.C. METODE DE OPTIMIZARI PARTIALE ALE MASINII

ELABORATE DE AUTOR SAU CU CONTRIBUTIA

AUTORULUI

1. Optimizarea pasului înfășurării (Y optim)

Așa cum se va vedea în acest capitol autorul elaborează o metodă originală de determinarea pasului înfășurării, optim din punct de vedere economic, cu menținerea constantă a factorului energetic al mașinii ($\eta \cos \varphi$).

S-a elaborat un algoritm și o subrutină în limbaj Fortran pentru determinarea cu ajutorul calculatorului electronic a lui Y optim.

Metoda este originală și elaborată în întregime de autor fiind aplicată la întreprinderea Electromotor Timișoara (I.E.M.T)

2. Metodă de optimizare longitudinală a mașinii de inducție

Este o metodă originală de optimizare folosind metoda stohastică - extrapolativă de corelare a cuplurilor parametru-criteriu la geometrie transversală constantă.

Elaborată de Conf.Dr.Ing. B.Oprendek de la Catedra U.M.E. a facultății de Electrotehnica I.P.T.V. din Timișoara, în colaborare cu autorul prezentei lucrări.

Aplicată la Intreprinderea Electromotor Timișoara.

CAP.D. PROGRAMAREA NELINIARA. MÉTODE SI TEHNICI SPECIFICE.
ALEGAREA SI ADAPTAREA ALGORITMILOR PENTRU OPTIMIZA-
REA MOTORULUI CU DUBLA COLIVIE

In literatura de specialitate consultată nu am întîlnit să fie abordată și soluționată problema optimizării proiectării motorului de inducție cu rotor în dublă colivie printr-o metodă de programare neliniară.

Merită subliniat faptul că optimizarea proiectării motorului cu colivie simplă (91) reprezintă un caz particular al problemei abordată în prezenta lucrare.

In prima parte a capitolului se face o scurtă fundamentală teoretică a condițiilor necesare și suficiente pentru existența extremin-ului cu legături în cazul unei funcții de n- variabile.

In a doua parte a capitolului am efectuat o trecere în revistă a principalelor metode de programare neliniară cunoscute, o descriere succintă a diferenților algoritmii și o prezentare mai detaliată a algoritmilor considerați de autor ca fiind cei mai adecvați pentru soluționarea problemei, evident, această selecție făcându-se în baza unei analize comparative a diferenților algoritmii din punct de vedere al eficienței.

Prin eficiența unui algoritm se înțelege, în analiza comparativă efectuată, capacitatea sa de a rezolva problema cu o anume acurateță dată și cu cheltuială de timp minimă pentru om și mașină.

Algoritmii utilizati în soluționarea problemei sunt :

- algoritmul ALEATOR ;
- algoritmul COMPLEX (BOX) ;
- metoda SUMT cu algoritmul POWELL ;

S-au utilizat mai mulți algoritmii în scopul determinării, în limitele de precizie acceptabile, a minimului global (minim minimorum) al funcției obiectiv.

De remarcat faptul că algoritmii utilizati au fost modificați și combinați în aplicarea lor, asupra funcției obiectiv neliniare cu restricții neliniare, în scopul creșterii eficienței acestora în determinarea minimului global, aşa cum se poate constata în capitolul la care ne referim.

CAP. E. MODELUL MATEMATIC

In programarea neliniară se pleacă dintr-un punct de start, sau punct initial, x_n^0 , situat în spațiul euclidian n-dimensional E^n .

In cazul optimizării proiectării motorului de inducție cu rotor în dublă colivie, punctul x_n^0 poate fi determinat în două moduri:

- Cînd este vorba de optimizarea unui motor existent atunci coordonatele lui x_n^0 sunt date de variabilele x_i ($i = 1, \dots, n$) ce reprezintă mărimele fizice alese de proiectant pentru definirea motorului existent, aşa cum se va vedea pe parcursul lucrării.

- Cînd se pune problema proiectării unui nou motor nou procedura este următoarea și conține două etape distincte.

Prima etapă se referă la proiectarea motorului după metode oarecum clasice fără a se pune aici problema optimizării lui.

Am denumit această parte a modelului matematic : proiectul initial al motorului (PRIMO).

Am utilizat mai sus expresia „metode oarecum clasice” întrucît și la această etapă autorul are anumite contribuții originale.

Astfel la determinarea geometriei transversale am introdus noi relații de calcul pentru determinarea crestăturilor din stator și rotor sub formă de subrutine.

Pentru cazul motorului cu bare înalte și pentru colivia de lucru a motorului cu dublă colivie, am introdus un nou tip de crestătură, neîntîlnită în literatura de specialitate, așa numita crestătură trapez-dreptunghi respectiv dublu trapez, aplicate cu succes la motoarele cu $2p = 4$ din gabaritele 180 și 200, pentru ameliorarea parametrilor de pornire.

Au fost introduse relații suplimentare și coeficienți de corecție, determinați experimental pe un număr mare de motoare în cadrul probelor de lot și de tip, pentru a ține seama de influența saturării căilor de dispersie precum și fenomenul de refuzare a curentului rotoric asupra parametrilor de pornire.

Totodată a fost introdusă o procedură specială, de tip subrutină, pentru calculul cît mai exact al curentului de magnetizare în special în dinții statorului și rotorului cu ridicarea experimentală a curbei de magnetizare a obțelului pentru miezul magnetic, măsurătorile făcîndu-se pe un număr mare de eșantioane (subrutina MAGNET).

De altfel întregul program (PRIMO) este prevăzut a trece pe calculator.

In lucrare este prezentată - din considerente de limitare a numărului de pagini - schema logică bloc a PRIMO cu principalele subrutine (Y opt, MAGNET).

Partea a doua conține modelul matematic propriu-zis pe care săn "grefați" algoritmii de optimizare aleși.

Acesta conține, în esență, funcția obiectiv $F(X)$ și funcțiile restricției $G_j(X)$; ($X = x_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$)). Elaborarea modelului matematic de astă manieră încît să descrie cît mai fidel fenomenele și să reprezinte cît mai exact funcția obiectiv și funcțiile restricției, toate neliniare, apelind la un număr rezonabil de variabile independente - astfel încît expresiile să nu devină prea "stufoase" - se poate afirma fără exagerare că reprezintă "cheia de boltă" al întregului edificiu de optimizarea proiectării.

Elaborarea modelului matematic, constituie contribuția exclusivă a autorului și comportă următoarele etape fundamentale:

- alegerea variabilelor independente;
- definirea funcției obiectiv;
- stabilirea restricțiilor și formularea lor;
- exprimarea parametrilor fizici ai mașinii funcție de variabilele independente.

CAP.F. PROGRAMUL DE OPTIMIZARE PROPRIUZIS. STUDIU
SUCCINT PENTRU JUSTIFICAREA ALEGERII METO-
DELOR DE OPTIMIZARE UTILIZATE

Programarea metodei ALEATOR

Programarea metodei ALEATOR conține în limbajul FORTRAN trei unități de programe și anume: un program principal și subrutele RESTR și FUNC.

Programul principal are ca sarcină comunicarea cu utilizatorul prin intermediul mărimilor de intrare și a celor de ieșire, apelarea repetată a subprogramelor RESTR și FUNC în evoluția către minim și determinarea condițiilor de sfîrșit al algoritmului.

Subrutina RESTR are rolul de a calcula și verifica restricțiile explicite ale căror exprimare este dată de autor (utilizator).

Subrutina FUNC are rolul de a calcula valoarea funcției obiectiv pentru parametrii transmisi.

Programarea metodei COMPLEX

Programarea metodei COMPLEX conține în limbajul FORTRAN şase unități de programe și anume: un program principal și subrutele COMPLEX; INLOC; INRES; VERIF; și FUNC.

Descrierea lor amănunțită se face la capitolul F.

Programarea metodei SUMT cu algoritmul POWELL

Programarea metodei SUMT prin algoritmul POWELL conține în limbaj FORTRAN patru unități de programe și anume : un program principal și trei subprograme de tip subrutină, denumite POWELL; MINIM și FUNC.

Descrierea acestora se face de asemenea la capitolul respectiv.

In conținutul capitolului F se regăsesc schemele logice detaliate, la nivel de instrucții, redate în anexele 9 + 14, pentru toate programele și subrutele amintite mai sus.

CAP.G. UTILIZAREA PRACTICA A METODEI DE OPTIMIZARE

ELABORATE

Metoda de optimizare, prin programare neliniară, elaborată de autor a fost aplicată concret la optimizarea unui motor de inducție cu rotor în dublă colivie, din fabricația întreprinderii Electromotor Timișoara.

Este vorba de motorul ASID 200 CT de 18,5 KW la 1500 r/m

In acest capitol sînt redate rezultatele numerice listate, obținute în baza rulării programelor, elaborate și descrise în cap. F pe calculatorul FELIX C.256.

In continuare se prezintă buletinul de încercări, emis de laboratorul de probe de tip al întreprinderii Electromotor și ICPE, buletin ce conține rezultatele experimentale, obținute pe baza măsurătorilor noului prototip realizat în baza proiectului elaborat cu noua metodă de proiectare optimală.

**CAP.H EFICIENTA ECONOMICA, OBSERVATII SI CONCLUZII
FINALE**

Aici se prezintă eficiența economică ca urmare a aplicării metodei de proiectare optimală a mașinii de inducție, precum și unele observații, propuneri și concluzii.

In final sînt redate o parte din anexe, unele fiind inserate în cuprinsul lucrării, precum și bibliografia consultată.

400.800
213F

CAP.B. PREZENTAREA SI ANALIZA CRITICA A
LITERATURII

1. Proiectarea mașinilor de inductie în sistemul actual

Este bine cunoscut faptul că sinteza proiectării unui motor de inducție se realizează pînă în prezent cu metode care ar putea fi denumite - metode de încercări și eliminări.

Proiectantul care „sintetizează” un motor de la început, este pus în fața multor variante posibile. Dacă geometria transversală nu este stabilită el trebuie să găsească cca 20 de dimensiuni privind toatele în afară de alte detalii ale circuitului electric și magnetic.

In total sunt cca 50 variabile.

Proiectantul tinde la o construcție care să satisfacă cerințele beneficiarilor precum și standardele naționale sau internaționale, reușita construcției bazîndu-se în principal pe experiența acumulată de proiectant.

De remarcat faptul că la definirea geometriei transversale a mașinii metodicele de proiectare, întîlnite în literatură de specialitate cît și metodicele proprii ale fabricilor constructoare de motoare electrice de inducție, lasă la latitudinea proiectantului stabilirea valorilor pentru mărimi importante cum ar fi: diametre, numere de crestături, forma și dimensiunile crestăturilor, și.a.

In cele ce urmează voi face o succintă analiză a metodicii de proiectare intitulată „DUBLACOL” utilizată la întreprinderea Electromotor Timișoara.

In cadrul întreprinderii Electromotor Timisoara activitatea de proiectare a motoarelor de inducție trifazate cu rotorul în scurtcircuit, cu simplă sau dublă colivie, are o pondere importantă în ansamblul activității de concepție.

Din acest motiv începînd din anul 1971, s-a trecut la automatizarea calculelor de proiectare a motoarelor de inducție realizîndu-se în acest sens o metodă de calcul DUBLACOL, programată în limbaj FORTRAN IV pe calculatorul FELIX - C. 256.

Metoda și programul realizat, având la bază metodica de proiectare a întreprinderii Electromotor, a permis, ca prin utilizarea calculatorului, să se obțină o reducere a timpului de proiectare necesar unei variante de motor de la cca 8 ore la 3 secunde.

Saltul spectaculos realizat s-a concretizat în mod pozitiv prin degrevarea personalului de înaltă calificare de muncă de rutină, permitînd abordarea asimilării unei game largi de produse - diversificînd substanțial profilul uzinei - precum și continuarea înnoirii produselor, făcîndu-le din ce în ce mai competitive pe piața internațională.

Programul de calcul realizat permite calcularea a maximum 81 de variante ale aceluiași tip de motor, prin combinarea unui număr de maximum 9 lungimi ale miezului magnetic cu maximum 9 variante de bobinaj statoric. Numărul variantelor de lungime prevăzut, este realizat prin indicarea valorii inițiale de la care încep calculele, a pasului de variație a lungimii și a numărului de pasi.

Variantele de bobinaj, statoric sunt indicate fiecare separat, numărul lor fiind testat de către programul de calcul printr-o variabilă de control.

De menționat faptul că în perioada 1971 - 1978, programul de calcul i-au fost aduse o serie de îmbunătățiri privind :

- corectarea sau înlocuirea unor relații de calcul depasite;
- introducerea unor noi tipuri de crestături statorice și rotorice, inclusiv 4 tipuri de crestături pentru dubla colivie;
- adaptarea sa pentru diverse tensiuni și frecvențe;
- introducerea unor subrute pentru utilizarea în calcule a unor materiale feromagnetice pentru confecționarea miezurilor;
- introducerea posibilității de calcul a bobinajului statoric și a coliviei rotorice cu diverse materiale conductoare (cupru, aluminiu, etc).

Toate aceste modificări au influențat favorabil utilizarea tot mai largă a calculatorului electronic în munca de proiectare.

Cu toate acestea metoda și programul de calcul DUBLACOL prezintă o serie de limitări majore, cum ar fi :

1.1. Utilizarea în calculele de proiectare a unei geometrii transversale date inițial

Aceasta presupune ca în datele de intrare necesare pentru executarea calculului parametrilor electromecanici, trebuie să fie incluse diametrele statorului și rotorului, numărul și forma creștăturilor statorice și rotorice cu valorile dimensiunilor acestora.

Programul se poate utiliza din acest motiv în rezolvarea următoarelor probleme :

- calcule de reproiectare a unor motoare la diverse tensiuni și frecvențe;
- calcule de cvasioptimizare longitudinală a unui motor dat;
- calcule de proiectare a unor motoare noi utilizând o geometrie transversală (tole stator - rotor) existentă;
- calcule de proiectare a unor motoare noi utilizând o geometrie transversală calculată anterior printr-o altă metodă.

In general adoptarea unei noi geometrii transversale se realizează de către proiectant, pe baza experienței acumulate, de regulă prin „derivare” de la o geometrie transversală existentă.

1.2. Lipsa unei corelații între calculul tehnic și cel economic

Din acest motiv determinarea variantei optime din punct de vedere tehnico-economic este incertă, ceea ce se obține fiind o variantă mai bună decât precedenta, dar nu cea optimă.

Existența unor abateri între parametrii calculați și cei măsurăți, care pentru parametrii $\cos\varphi$, $KM_p \cdot Kl_p$ pot duce la erori de pînă la 10 - 15 %.

Din acest motiv pentru diversele tipuri de motoare este necesară stabilirea unor coeficienți de corecție a relațiilor de calcul, pe baza încercării unui prototip, executat conform datelor rezultate din calcul și extrapolarea acestor coeficienți la toate variantele de calcul ce se execută ulterior.

*

* * *

Din cele de mai sus se poate desprinde concluzia că metoda și programul DUBLACOL REPREZINTĂ un mare pas înainte în activitatea de proiectare, ea având însă limitări în ceea ce privește determinarea certă a variantei optime din punct de vedere tehnico-economic.

Din aceste motive este necesară elaborarea și punerea la punct a unei metode noi de proiectare, care plecind de la parametrii impuși motorului să execute proiectarea și totodată optimizarea din punct de vedere tehnico-economic.

2. Analiza metodelor de optimizare cunoscute

Optimizarea proiectării mașinilor de inducție a fost abordată oarecum sistematic de abia în ultimul deceniu ca o consecință firească a disponibilităților de calcul pe care le oferă ordinatoarele de mare capacitate.

Primele etape parcursă au fost acelea ale optimizărilor parțiale, unele dintre acestea (81), (110) aplicîndu-se cu succes și în prezent.

Metodele optimizărilor parțiale au pornit de la ideea că optimizînd unele subansamble rezultă implicit un efect de ameliorare a întregului ansamblu.

În domeniul mașinilor de inducție există trei obiecte principale ale optimizării parțiale și anume : geometria transversală, infășurările mașinii și geometria longitudinală.

În ultimii ani a fost abordată problema optimizării cva-sigenerale a mașinii de inducție.

In paragrafele următoare vor fi prezentate succint metode de optimizare ale mașinii de inductie, cunoscute din literatura de specialitate, evidențiind avantajele specifice și remarcând în același timp eventualele neajunsuri ale fiecărei metode studiate sau elaborate de autor pînă la metoda generală de optimizare, utilizînd programarea neliniară, care va fi tratată detaliat în capitolele următoare.

2.1. Optimizarea geometriei transversale

Una din metode se bazează pe ideea lucrării lui FROHNE (45), care susține că la proiectarea dimensiunilor principale ale unei mașini (ca diametre, numere de crestături) trebuie avute în vedere realizări existente astfel încît optimizarea se va putea referi numai la dimensiuni de detaliu, care determină de fapt caracteristicile mașinii. În consecință, autorul consideră că variabile independente numai forma și dimensiunile crestăturii statorice, acestea putînd fi exprimate în funcție de înălțime și de secțiune. Cele două condiții de optimizare propuse de FROHNE: tensiunea magnetică minimă și pierderi statorice minime, permit elaborarea unui program cu un procedeu interativ care să ducă la stabilirea celor două variabile determinante pentru dimensiunile transversale.

De remarcat că metoda nu optimizează direct nici un parametru nominal al mașinii avînd totuși un efect sigur de îmbunătățire a factorului de putere și a randamentului.

Pe de altă parte metoda nu ține cont de ceilalți parametri și de costul mașinii. Mai mult chiar, criteriile formulate pentru optimizarea parțială ar putea să îndepărteze mașina de optimul general. Metoda nu abordează optimizarea geometriei transversale a rotorului.

Din motivele arătate considerăm că metoda poate fi utilizată cu succes ca o subrutină în cadrul unui procedeu general, de optimizare totală, care verifică ansamblul criteriile funcționale și economice.

O metodă de optimizare parțială a geometriei transversale a rotorului este prezentată de LUTZ (60), pentru optimizarea a doi parametrii: deschiderea și înălțimea istmului crestăturii rotorice la un motor de inductie cu colivie simplă avînd bare rotunde.

Metoda propusă de LUTZ, utilizează în programul de optimizare algoritmul LOOK al lui Hooke și JEEVES (47).

Ca și în metoda precedentă și aici nu se optimizează direct parametrii nominali ai mașinii, metoda contribuind indirect la ameliorarea parametrilor de pornire.

Epuran M., Tatu Gheorghe în (36) abordează obținerea optimului economic în fabricația mașinilor electrice de inducție utilizând metoda „analizei valorii”.

De remarcat că procedeul utilizat este recomandat în special pentru reducerea costurilor materiale și de manoperă la elaborarea elementelor constructive ale mașinilor, cum sunt carcasa, scuturile, cutia de borne, arborele și.a. pentru a căror optimizare tehnico-economică nu s-au elaborat metode matematice.

2.2. Optimizarea înfășurărilor

Înfășurările mașinii de inducție constituie subansamblul cel mai scump și cel mai puțin fiabil dintre principalele subansambluri ale acesteia.

Plecînd de la aceste considerente o metodă de optimizare care să minimizeze costul înfășurării a constituit un vechi deziderat al constructorilor de mașini electrice.

Problema de optimizare a înfășurării poate fi privită din mai multe puncte de vedere, toate avînd comun faptul că spațiul avut la dispoziție și anume crestătura are o valoare dată.

Elementele distinctive între metode sunt variabilele optimizate și scopul urmărit.

Astfel REICHE (93), indică o schemă programabilă pentru alegerea diametrelor conductoarelor de bobinaj. Cu unele complementări schema ar putea fi transformată într-un program de optimizare a umplerii crestăturilor.

WACHTER (116) definește un „factor de așezare” a conductorilor în crestătură, care dă indicații asupra unui element tehnicologic util pentru producător, acela al „facilității bobinării” respectiv o reducere a costului manoperei de bobinaj. Cunoașterea acestui element este utilă la optimizarea unei înfășurări întrucât permite introducerea în programul principal a restricțiilor tehnologice pe lîngă criteriul economic.

Oprendeck, Tatu, Constantin (80) elaborează un procedeu de obținere a unor înfășurări cu fiabilitate ridicată ceea-

ce conferă o exploatare optimă din punct de vedere al costurilor de întreținere și a menenabilității motoarelor la beneficiar.

Procedeul constă într-o stabilizare a rigidității dielectrice a izolației în ansamblu și în special a izolației între spire, printr-o îmbătrânire accelerată, distructivă, a punctelor slabe ale acesteia, prin solicitări complexe mărite, simultane, de tensiune, curent, șocuri mecanice și vibrații, preventive și nedistructive la nivelul calității nominale a izolației, într-o fază tehnologică în care eventualele defecte întâmplătoare sunt ușor remaniabile, de exemplu înaintea impregnării înfășurării.

Solicitările de tensiune, în special a izolației între spire, se realizează prin aplicarea pe înfășurare a unor trenuri de impulsuri sau de oscilații, întreținute sau de relaxare, de înaltă tensiune, cu o amplitudine pe spiră multiplă celei nominale produse de un generator de impulsuri repetate iar solicitările mecanice și vibrațiile precum și simultaneitatea acestora cu solicitările electrice se realizează pe cale electrică, prin efectul forțelor electrodinamice ce apar la trecerea, în acest scop, prin înfășurări a unor /tensiuni/ trenuri de impulsuri sau a unor trenuri de oscilații întreținute sau amortizate de curent, de amplitudine reglabilă prin parametrii generatorului de impulsuri.

În vederea asigurării caracterului preventiv și nedistructiv al solicitărilor, se limitează tensiunea și energia pe impuls și numărul de impulsuri aplicate înfășurării, la valori ce garantează menținerea nivelului nominal al rigidității dielectrice a izolației, prin reglarea corespunzătoare a parametrilor generatorului de impulsuri repetitive.

Bobinele care în urma încercărilor au străpuns, adică acele care în exploatare s-ar fi defectat ca urmare a existenței unor puncte slabite ale izolației, sunt înlocuite cu alte bobine și probele se repetă; dacă în urma probelor efectuate nu rezultă existența unor străpungeri, înfășurările pot fi impregnate, având garantată o fiabilitate ridicată.

Tatu (110) definește un program de optimizare (minimizare) a costului înfășurării mașinii de inducție prin determinarea unui pas de bobinaj optim din punct de vedere tehnico-economic.

La elaborarea acestui procedeu se pleacă de la premisa că mașina a fost corect dimensionată din punct de vedere al

încărcărilor electromagnetice. Lucrarea se prezintă succint în cap. C.1.

2.3. Metode cvasigenerale de optimizare

Appelbaum în (8); (9); (9') și Appelbaum J - Erlicki M.S în (7) respectiv Erlicki M.S. - Appelbaum J. în (37) abordează proiectarea optimală a mașinii de inducție recurgând la programarea neliniară.

Se definesc inițial ca variabile independente :

D_1 - diametrul interior al statorului;

L - lungimea pachetului statoric;

α_1 - lățimea medie a crestăturii statorice;

h_1 - adâncimea crestăturii statorice;

h_2 - adâncimea crestăturii rotorice;

h_{j1} - înălțimea miezului statoric;

h_{j2} - adâncimea miezului rotoric;

B - inducția în întrefier;

j_1 - densitatea curentului în bobina statorului;

j_2 - densitatea curentului în bobina rotorului.

Ca restricții se aleg:

i - curentul de magnetizare;

i_k - raportul curentului de pornire către cel nominal;

t - raportul cuplului maxim către cel nominal;

η_N - randamentul la sarcina nominală.

După ce exprimă funcția de cost și restricțiile în raport cu variabilele independente se face o analiză calitativă, pentru un motor dat, în două ipoteze și anume :

- (a). determinarea tendinței de schimbare a variabilelor independente din punct de vedere al minimizării funcției de cost fără a ține cont de restricții;
- (b). analiza variației funcție de cost și a restricțiilor la o variație a parametrilor independenti, cu stabilirea domeniului de variație a acestora.

Pentru stabilirea minimului relativ se recurge la o soluție simplificatoare, în sensul că problema cu n variabile independente se transformă în $n/2$ probleme cu funcții de două variabile.

Se alege cîte un cuplu de 2 variabile, celelalte fiind considerate constante, funcțiile de cost și restricții se reprezintă grafic în planul celor 2 variabile, definind un domeniu conex; se determină minimul funcției de cost pe graficul respectiv și implicit valorile corespunzătoare pentru x_1, x_2 .

Se continuă astfel pentru perechile $x_3, x_4 \dots x_{n-1}, x_n$; încheindu-se primul ciclu.

La o a doua iterație se procedează analog cu mențiunea că în expresiile funcțiilor se introduc ca și constante cele $(n-2)$ variabile cu valorile optime obținute în primul ciclu, numărul ciclurilor depinzînd de precizia cerută (9').

Este evident că menținerea constantă a celor $(n-2)$ variabile la parcurgerea unui ciclu afectează serios precizia rezultatelor pe de o parte, iar pe de altă parte introducerea valorilor optimale stabilite în cele $\frac{n}{2} - 1$ grafice într-unul din grafice este de departe o soluție fortuită.

De remarcat faptul că nu se păstrează toate cele 10 variabile pînă în final, în unul din cazuri se mențin 8 iar în altul 6.

Ar mai fi de menționat faptul că pentru a putea urmări influența perechilor de parametrii asupra minimului funcției de cost ar trebui realizate la limita $C_{10}^2 = 45$ grafice - la o interație și nu 3 sau 4 ca în exemplele alese de autori.

Cu toate acestea metoda indicată este sugestivă și reprezintă un real progres față de metodele clasice de proiectare.

Kagan B.M. - Ter Mikaelian T.M. în (52) adoptă o metodă similară cu cea descrisă anterior lucrînd cu numai patru va-

riabile și cu cinci restricții.

Ramarathnam R; Desai B.G. în (89) și Ramarathnam R; Desai B.G., Suba-Rao V în (90) abordează problema optimizării proiectării motoarelor de inducție ca o problemă de programare neliniară.

Se definesc și aici variabilele independente, funcția de cost și funcțiile restricției. Programul este aplicat la optimizarea unui motor de 10 kW, 1500 r/m cu colivie simplă.

În toate ipotezele descrise se procedează la transformarea problemei cu restricții într-o problemă fără restricții utilizând metoda SUMT - a funcțiilor de penalizare a lui Fiacco - Mc Cormick (40); (41); (42).

Autorii consideră că cei mai eficienți algoritmi, în problema respectivă, algoritmul LOOK a lui Hooke și Jeeves (47) urmat îndeaproape de algoritmul direcțiilor conjugate a lui Powell (86) ambii algoritmi făcînd parte din categoria algoritmilor care nu utilizează gradientul funcției de optimizat.

Observații.

Referitor la modelul matematic; nu rezultă din relațiile de calcul a parametrilor de pornire în ce măsură se ține seama de saturarea căilor de dispersie și de fenomenul de refulare a curentului în colivia rotorică.

De altfel modelul matematic se referă la un motor cu colivie simplă; nu descrie fenomenele specifice motoarelor cu bare înalte sau dublă colivie. Sub acest aspect reprezintă, oarecum, un caz particular.

Relația pentru calculul încălzirii are un pronunțat caracter empiric.

Funcția obiectiv ia în considerare numai costul materialelor active fără manoperă și fără costul materialelor aferente părții constructive a mașinii (carcasă, scuturi, arbore, etc).

Referitor la tehniciile specifice programării neliniare. Utilizând metoda SUMT combinată cu algoritmii specifici minimizării neconstrînse minimul obținut este un minim local.

Aceasta rezultă și din reprezentarea grafică a variației parametrilor cu pondere în structura funcției de cost - cum săint:

diametrul interior și lungimea miezului magnetic care nu se modifică sensibil, cînd în realitate ar trebui să aibă gradiențe foarte mari.

Autorii utilizează exclusiv metoda SUMT, ori este cunoscut faptul că un algoritm specializat unei probleme cu structură specială este mai eficient decît metoda SUMT (34).

Apare oarecum curios faptul că autorii conferă algoritmului LOOK a lui Hooke și Jeeves cea mai ridicată eficiență, ori din literatura consultată (a se vedea bibliografia), acest algoritm este relativ rudimentar în comparație, de exemplu, cu algoritmul lui Rosenbrock (99) sau cu cel al lui Powell (86).

Dintr-o legitimă curiozitate, în cadrul rulării diverselor programe de minimizare utilizate la fundamentarea lucrării subsemnatului, am încercat și algoritmul LOOK combinat cu tehnica SUMT (metoda punctului interior - folosită și de Ramarathnam).

Programul nu a rulat convergent „agățîndu-se” la prima interație.

Explicația constă în faptul că minimul se află la „frontiera” domeniului ori algoritmul LOOK - prin structura sa în fază „cercetări şablon” (pattern search) va viola de fiecare dată restricțiile, provocînd criteriul de STOP.

Cu toate aceste observații merită subliniat faptul că autorii lucrării (89), (90), au deschis cu această meritorie lucrare o „pîrtie de slalom” - sper ca expresia să nu pară neacademică - în coborîrea spre minim la proiectarea motoarelor de inducție cu colivie simplă. Din păcate cele două articole, ci-tate, singurele accesibile sunt destul de succinte.

CAP.C. METODE DE OPTIMIZARI PARTIALE ALE MASINII
ELABORATE DE AUTOR SAU CU CONTRIBUTIA AU-
TORULUI

1. Optimizarea pasului înfășurării (Y optim)

Practica arată că la mașina de inducție armonicile cîmpului se pot amortiza suficient prin alegerea corespunzătoare a numărului de bare din rotor și a înclinării acestora. Astfel, scurtarea pasului înfășurării statorice poate fi determinată, în principal din considerente economice.

In literatură se arată (12) că există o scurtare economică optimă, dar nu se indică soluții tehnice precise pentru determinarea ei.

Astfel exprimarea dependenței $Y_{opt} = f(\frac{l}{\tau})$ impune aprecierea unui factor de putere ($\cos \varphi$) și de asemenea nu se remarcă faptul că în practică nu se poate realiza orice scurtare, aceasta putind avea anumite valori discrete.

1.1. Rezolvare numerică.

In cele ce urmează s-a ținut cont de scurtările practic posibile în funcție de numărul de creștături pe pol și fază.

S-a impus a priori, condiția $B_g = ct$ și $R_1 = ct$ pentru a nu deteriora performanțele mașinii.

B_g - inducția de intrefier;

R_1 - rezistența ohmică a unei faze;

Optimul se calculează în funcție de raportul

$$\frac{a}{b} = \frac{l_1}{l_{fl}}$$

l_1 - lungimea miezului magnetic;

l_{fl} - lungimea capetelor de bobină;

τ - pasul polar

mărimi care reprezintă date certe din fabricație, neafectate de ipoteze simplificatoare sau erori de calcul.

Se presupune inițial că deschiderea Y a bobinei, secțiunea Q a conductorului și numărul N_1 de spire ale fazei sunt mărimi variabile.

Pentru o tratare cît mai generală a problemei, relațiile și mărimile, ce intervin în calcule, vor fi exprimate în valori relative.

Drept condiții initiale ale problemei se impun:

$$B_f = ct$$

$$R_1 = ct$$

Altfel spus, se impune menținerea constantă a pierderilor în cupru și a pierderilor în fier, precum și a curentului de mers în gol, respectiv a factorului de putere.

In esență se prevede, deci, o optimizare a scurtării pasului de bobinaj cu menținerea performanțelor mașinii.

Din relația tensiunii electromotoare induse în înfășurarea unei faze, tensiunea presupusă constantă,

$$U_e = \pi \sqrt{2} k_c k_b k_y N_1 f_1 \emptyset$$

unde:

$$k_b = \frac{\sin \varphi \frac{\pi p}{Z_1}}{\sin \frac{\pi p}{Z_1}} \quad - \text{factorul de zonă;}$$

$$k_c = \frac{\sin \frac{c}{\tau} \frac{\pi}{2}}{\frac{c}{\tau} \frac{\pi}{2}} \quad - \text{factor de înclinare;}$$

c - înclinarea crestăturii;

$$k_y = \sin \frac{Y}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2} \quad - \text{factor de scurtare;}$$

Z_1 - numărul de crestături statorice;

N_1 - numărul de spire pe fază

rezultă, la $B_f = ct$ și $\emptyset = ct$, implicit condiția $k_y N_1 = ct$,

unde $k_y = \sin y \frac{\pi}{2}$ este factorul de scurtare, definit anterior,
unde am notat $y = \frac{\gamma}{2}$ (vezi și rel.(14)).

Calculul se face în ipoteza că înfășurarea inițială este cu pas diametral ($r_i = \tau$; $k_{yi} = 1$).

Raportând situația curentă la cea inițială se obține:

$$\frac{k_y}{k_{yi}} \cdot \frac{N_1}{N_{li}} = 1 \quad (1)$$

Dacă notăm cu :

$$\Delta = \frac{k_y}{k_{yi}} = \frac{\sin y \frac{\pi}{2}}{1}; \quad n_1 = \frac{N_1}{N_{li}} \quad (1.1)$$

variația relativă a mărimilor în cauză, rezultă, pentru condiția $B_\delta = ct$, relația:

$$n_1 \cdot \Delta = 1 \quad (1.2)$$

Pentru cea de a două condiție inițială scriem :

$$R_1 = R_{li} \quad (2)$$

sau:

$$\rho N_1 \frac{l_{sp}}{Q} = \rho N_{li} \frac{l_{spi}}{Q_i} \quad (2.1)$$

unde:

ρ - rezistivitatea materialului conductorului;

Q, Q_i - secțiunea conductorului, curentă și inițială;

l_{sp}, l_{spi} - lungimea spirei, curentă și inițială,

mai putem scrie :

$$l_{sp} = l_{ci} + l_{fi} \quad (2.2)$$

$$l_{sp} = l_{ci} + y l_{fi} \quad (2.3)$$



unde:

l_{ci} - este lungimea laturilor din crestătură;

l_{fi} - lungimea capetelor de bobină.

Cu aceste notări relația (2.1) devine :

$$\sigma_{N_1} \frac{l_{ci} + yl_{fi}}{Q} = \sigma_{N_{li}} \frac{l_{spi}}{Q_i} \quad (2.4)$$

Raportând totul la rezistența inițială R_{li} rezultă:

$$r_1 = \frac{R_1}{R_{li}} = \frac{N_1 \frac{l_{ci} + yl_{fi}}{Q}}{N_{li} \frac{l_{spi}}{Q_i}} = \frac{n_1}{q_r} (a + yb) \quad (3)$$

unde:

$$r_1 = \frac{R_1}{R_{li}} \quad - \text{valoarea relativă a rezistenței fazei};$$

$$a = \frac{l_{ci}}{l_{spi}} \quad - \text{lungimea relativă a laturilor de bobină din crestătură, inclusiv ieșirile axiale.}$$

$$b = \frac{l_{fi}}{l_{spi}} \quad - \text{lungimea relativă a capetelor frontale};$$

$$q_r = Q/Q_i$$

Condiția de rezistență constantă conduce, deci, la:

$$r_1 = \frac{n_1}{q_r} (a + yb) = 1 \quad (4)$$

Costul cuprului rezultă din:

$$C = p_{cu} \gamma_{cu} V_{cu} = p_{cu} \gamma_{cu} Q N_1 (l_{ci} + yl_{fi}) \quad (5)$$

unde:

p_{cu} - prețul cuprului, în lei/kg;

γ_{cu} - greutatea specifică;

V_{cu} - volumul cuprului.

Raportînd la valoarea inițială se obține variația costului:

$$c = \frac{C}{C_i} = \frac{p_{cu} \gamma_{cu} Q n_1 (l_{ci} + y l_{fi})}{p_{cu} \gamma_{cu} Q_i N_{li} l_{spi}} = q_n n_1 (a + by) \quad (6)$$

Economiile ce se obțin, exprimate în valori procentuale sunt:

$$e = (1-c) 100 \% = 1 - q_n n_1 (a+by) 100 \% \quad (7)$$

Pentru determinarea soluțiilor optime, respectiv pentru determinarea maximului funcției e , trebuie rezolvat sistemul :

$$\frac{de}{dy} = 0 \quad (8)$$

$$R_1 = ct$$

$$B_6 = ct$$

respectiv:

$$\frac{de}{dy} = \frac{d}{dy} \left[1 - q_n n_1 (a + by) \right] = 0 \quad (8.1)$$

$$\frac{n_1}{q_n} (a + by) = 1$$

$$n_1 \Delta = 1$$

Ceea ce conduce la :

$$q_n = n_1 (a + by) = \frac{a + by}{\Delta} \quad (3.1)$$

adică la:

$$\frac{d}{dy} \left[1 - \left(\frac{a + by}{\Delta} \right)^2 \right] = 0 \quad (8.2)$$

și deci la:

$$2 \left(\frac{a + by}{\Delta} \right) \cdot \frac{b\Delta - (a + by) \frac{d\Delta}{dy}}{2} = 0 \quad (8.3)$$

respectiv la:

$$b\Delta - (a + by) \frac{d\Delta}{dy} = 0 \quad (8.4)$$

care se mai poate scrie :

$$b \sin y \frac{\pi}{2} - (a + by) \frac{\pi}{2} \cos y \frac{\pi}{2} = 0 \quad (8.5)$$

sau:

$$\frac{\sin y \frac{\pi}{2}}{\cos y \frac{\pi}{2}} - \left(\frac{a}{b} + y \right) \frac{\pi}{2} = 0 \quad (8.6)$$

adică:

$$\frac{2}{\pi} \operatorname{tg} y \frac{\pi}{2} - \left(\frac{a}{b} + y \right) = 0 \quad (8.7)$$

Pentru o rezolvare mai ușoară, ecuația se pune sub forma:

$$\frac{2}{\pi} \operatorname{tg} y \frac{\pi}{2} - y = \frac{a}{b} \quad (8.8)$$

Dacă situația inițială se referă la o mașină a cărei înfășurare prezintă o scurtare oarecare y_i , relația (8.8) își păstrează formă cu mențiunea că în acest caz se modifică raportul $\frac{a}{b}$ după cum urmează:

Cu notatiile de mai înainte putem scrie:

$$a = \frac{l_{ci}}{l_{spi}} ; \quad b = \frac{l_{fi}}{l_{spi}} \quad - \text{pentru pas inițial diametral}$$

și

$$a_i = \frac{l_{ci}}{l_{ci} + y_i l_{fi}} ; b_i = \frac{y_i l_{fi}}{l_{ci} + y_i l_{fi}} - \text{pentru pas initial scurtat}$$

Făcind rapoartele:

$$\frac{a}{b} = \frac{l_{ci}}{l_{fi}} \text{ și } \frac{a_i}{b_i} = \frac{l_{ci}}{y_i l_{fi}} \quad (9)$$

rezultă că:

$$\frac{a}{b} = \left(\frac{a_i}{b_i} \right) y_i \quad (9.1)$$

respectiv raportul $\left(\frac{a}{b} \right)$ devine $\left(\frac{a_i}{b_i} \right) y_i$

Economiile de cupru ce se obțin față de o înfășurare diametrală, rezultă conform relațiilor (7), (8.2) și (8.8).

$$e = 1 - \left(\frac{a + b y_{opt}}{\Delta_{opt}} \right)^2 = 1 - b^2 \left[\frac{\frac{2}{\pi} \operatorname{tg} y_{opt} \frac{\pi}{2}}{\Delta_{opt}} \right]^2 \quad (10)$$

$$\text{cum } a + b = 1; \text{ avem } \frac{a}{b} + 1 = \frac{1}{b}; \text{ sau } b = \frac{1}{1 + \frac{a}{b}}$$

respectiv:

$$e = 1 - \left[\frac{\frac{2}{\pi} \operatorname{tg} y_{opt} \frac{\pi}{2}}{\left(1 + \frac{a}{b} \right) \sin y_{opt} \frac{\pi}{2}} \right]^2 = 1 - \frac{1}{\left[\frac{\pi}{2} \left(1 + \frac{a}{b} \right) \cos y_{opt} \frac{\pi}{2} \right]^2} \quad (10.1)$$

1.2 Utilizarea practică a rezultatelor

Definim şirul de valori (y_j) , avînd ratia egală cu un pas de crestătură statorică, pornind de la relaţiile :

$$y_j = \frac{j}{3q} \quad (11)$$

unde:

$$j_{\text{întreg}} = \left(\frac{3q}{2}\right), \left(\frac{3q}{2} + 1\right), \left(\frac{3q}{2} + 2\right), \dots, (3q-1)$$

$$q = 1, 2, \dots, 20; \quad q = \text{numărul de crestături pe pol și fază}$$

Observaţie:

In program $q \Rightarrow k$ pentru a nu se confunda cu Q (secţiunea conductorului).

Din şirul y_j se determină $y_j = y_{\text{opt}}$ după procedura descrisă în continuare.

Calculul numeric a expresiilor (8.8) și (10.1) în intervalul $q = 1, 2, \dots, 20$; interval care cuprinde întreaga gamă de maşini de inducţie de uz general, se efectuează fără dificultate pe un calculator numeric în baza programului elaborat în acest scop, a cărui schemă logică este redată în anexa (1).

Dându-se lui y valorile posibile (quantizate), potrivit secvenţei (11), rezultă listingul din tab. nr.1, anexa (2), care conține valorile corespunzătoare ale lui a/b (notat cu Z) și ale lui e , potrivit relaţiilor (8.8) și (10.1).

Tinînd cont că scurtarea pasului înfăşurării variază quantizat, raportul a/b (notat cu Z în program) la care scurtarea trebuie să varieze cu o crestătură, rezultă din condiţia ca în acel punct cele două soluţii să aibă aceeaşi eficienţă.

Această condiţie se poate exprima astfel :

$$c_{j,q} = c_{j+1,q} \quad (12)$$

adică, tinînd seama de relaţiile (6) și (3.1), avem :

$$\frac{z_{j,q} + y_{j,q}}{z_{j,q} + y_{j+1,q}} = \frac{\sin Y_{j,q} \frac{\pi}{2}}{\sin Y_{j+1,q} \frac{\pi}{2}} \quad (13)$$

de unde rezultă:

$$z_{j,q} = \frac{y_{j+1,q} \sin Y_{j,q} \frac{\pi}{2} - y_{j,q} \sin Y_{j+1,q} \frac{\pi}{2}}{\sin Y_{j+1,q} \frac{\pi}{2} - \sin Y_{j,q} \frac{\pi}{2}} \quad (14)$$

Dându-se din nou lui Y valorile posibile (discrete), potrivit secvenței (11), rezultă listingul (tab. nr. 2, anexa (3)), cu domeniile $Z_{j,q}$ în care Y este constant și respectiv limitele acestor domenii de la care Y variază cu un pas de creștere.

Pentru a optimiza sub acest aspect un motor, se va proceda după cum urmează.

In cazul unui motor având îmfășurarea cu pas diametral ($Y=1$) se determină practic prin măsurători, în cazul în care motorul este în fabricație curentă, raportul $\frac{a}{b}$.

Să presupunem că este vorba de un motor având $q = 3$ și că din măsurători a rezultat $\frac{a}{b} = 0,95$. Parcurgind tab. nr. 2 rezultă $y_{opt} = \frac{7}{9}$ pentru acest tip de motor.

Să trece la modificarea îmfășurării adoptând:

- scurtarea recomandată (y_{opt});
- un număr de spire cât mai aproape de raportul

$$n_1 = \frac{N_1}{N_{li}} = \frac{1}{\Delta} = \frac{1}{\sin y_{opt} \frac{\pi}{2}} \quad (15)$$

- o secțiune micșorată cât mai aproape de:

$$q_n = \frac{Q}{\omega_i} = n_1 (a+b y_{opt}) \quad (15')$$

La motoare din fabricație, având pasul Y deja scurtat se procedează astfel:

- se determină la secția de bobinaj valorile reale ale raportului $\frac{a_i}{b_i}$;
- cu relația (9.1) se calculează $\frac{a}{b}$;
- se verifică, în conformitate cu tab. nr. 2 dacă scurtarea adoptată corespunde la cea recomandată (Y_{opt});
- dacă nu corespunde, se modifică în consecință, sau dacă este la limită, se trece la proxima scurtare mai mică și se modifică înfășurarea ca număr de spire și secțiunea cuprului similar cazului precedent;
- se calculează economiile.

In cazul mai general, atunci cînd este vorba de proiectarea unui motor nou, utilizînd programul DUBLACOL, sau cînd se procedează la optimizarea longitudinală a unui motor sau serii de motoare, utilizînd programul OPTILIM, programul aferent metodei Y_{opt} , devine o subrutină a programelor menționate anterior.

In această situație raportul $\frac{a}{b}$ evident că nu se mai măsoară ci se calculează cu relațiile date în metodica de proiectare respectivă pentru o anumită scurtare a pasului înfășurării indicată în literatura de specialitate și cu relația (9.1).

Cu $\frac{a}{b}$ astfel determinat se calculează Y în conformitate cu relația (8.8) valoarea obținută fiind rotunjită la un număr întreg de crestături.

Se consultă tabelul nr. 2 și în cazul în care raportul $\frac{a}{b}$, cu care s-a calculat Y potrivit relației (8.8), se încadrează în intervalul prescris pentru acel Y , Y -ul astfel calculat este Y_{opt} .

Dacă $\frac{a}{b}$ se află la extremitatea unui interval din tab. nr. 2, de exemplu pentru $q = 4$, dacă $\frac{a}{b} = 1,081$ se reține ca Y_{opt} valoarea $\frac{9}{12}$ și nu $\frac{10}{12}$.

In final, cu relația (10.1) se calculează economiile.

In anexa (4) se prezintă calculul economic pentru un gabarit de motoare la care s-a introdus pasul Y_{opt} în locul pasului inițial Y_i .

2. Metodă de optimizarea geometriei longitudinale
(81), (126)

(Optimizarea lungimii miezului magnetic și a înfăsu-
rării statorice la geometrie transversală constantă)

Din punct de vedere al producătorului de mașini electrice problema optimizării poate fi privită și în modul următor: dată fiind o construcție deja elaborată și asimilată în fabricație să se găsească o metodă de optimizare aplicabilă într-un interval de timp scurt și cu cheltuieli de pregătire minime. În acest mod metoda va fi optimă în sensul aplicării ori de câte ori modernizarea proceselor tehnologice respectiv apariția unor materiale noi, cu caracteristici superioare, ar justifica o reproiectare.

Rezolvarea problemei enunțată ca mai sus este dată de OPRENDECK - TATU, în (81), aplicând optimizarea longitudinală bazată pe metoda extrapolării stohastice.

Extrapolarea este valabilă în ipoteza că geometria transversală este identică la cele două motoare: de referință și extrapolat.

De asemenea solicitările electromagnetice identice sau mai mari la motorul extrapolat în limitele plajei de toleranțe la parametrii nominali cum se va observa în continuare.

In consecință s-au stabilit ca variabile ale extrapolării: lungimea miezului magnetic, numărul de spire pe fază, secțiunea conductorului înfășurării și pasul de bobinaj.

Este remarcabil faptul că modificările tehnologice implicate de schimbarea în fabricație a variabilelor menționate nu sunt costisitoare și pot fi efectuate rapid întrucât toate, carcasa, scuturile, arborele precum și alte elemente constructive, ce reclamă SDV-uri costisitoare, rămân nemodificate.

Metoda propusă pentru realizarea optimizării longitudinale comportă două categorii de date de intrare:

(a). Valorile măsurate în gol și scurtcircuit, adică valorile măsurate la încercările de lot ale motoarelor din fabricația curentă, rezultate ale încercărilor pe un lot între treizeci și o sută de motoare.

(b). Valorile măsurate la încercările de tip efectuate pe un număr de minim cinci motoare din același tip desigur și pentru aceeași tensiune nominală respectiv aceeași conexiune a înfășurării primare (Y sau Δ), date care permit determinarea unor corelații între valorile măsurate la probele de lot de pe o parte, iar pe de altă parte parametrii nominali previzibili.

Prima operație, conform metodei propuse, este folosirea datelor de intrare pentru determinarea valorilor de calcul „cele mai probabile” ale seriei din fabricație, adică valabile pentru un motor reprezentativ al seriei. Acest motor va constitui „referința” pentru extrapolare.

In continuare, pe baza referinței, se calculează motoarele extrapolate pentru toate punctele posibile, folosind anumiți pași, din spațiul celor patru variabile, în realitate trei variabile întrucât pentru pasul de bobinaj (Y) se adoptă, utilizând inițial metoda expusă la Y optim.

Reținerea de fiecare dată (pentru un anumit l_{fe}) a motorului optim, deci maxim din punct de vedere al economiilor realizate în raport cu referința, constituie o problemă relativ simplă de programare.

In cele ce urmează vom face o prezentare a metodei de optimizare longitudinală justificată prin caracterul ei de noutate și eficiență economică.

2.1. Noțiunile de statistică matematică și de calculul probabilităților utilizate în elaborarea metodei stohastice - extrapolative nu se mai redau în text, din considerente de economia lucrării, menționând doar că s-a recurs la literatura de specialitate având ca referințe (53), (53'), (63) precum și STAS 1893-50 (Statistica matematică - calculul probabilităților).

2.2. Prezentarea etapelor metodei stohastice - extrapolative

Metoda comportă în principal următoarele etape:

- (a). Prelucrarea datelor obținute la probele de tip, mărimi care vor servi la stabilirea corelației dintre parametrii și criterii respectiv la reprezentarea grafică a dreptei de regresie <parametru-criteriu>
- (b). Prelucrarea datelor obținute la încercările de lot, mărimi care servesc la stabilirea valorilor modul ale parametrilor seriei curente din fabricație.
- (c). Calculul parametrilor fizici și ai parametrilor de regim pentru noua variantă folosind metoda stohastică - extrapolativă pentru parametrii și criterii.
OBS. Respectiva variantă reprezintă un optim local pentru anumite valori discrete ale lui k , n_1 , q_{lr} , γ_{opt} unde k , n_1 , q_{lr} sunt valorile relative ale lungimii miezului magnetic, numărului de conductori activi în crestătura statului, secțiunea relativă a conductorului, iar γ_{opt} este pasul optim de bobinaj.
- (d). Calculul economiilor posibile pentru varianta de la pct. c.
- (e). Determinarea variantei optime (optim global) prin listarea optimelor locale de la pct. c.

Pentru parcurgerea etapelor descrise anterior, vom exprima parametrii fizici ai mașinii de inducție în valori relative, raportând valorile curente la cele inițiale. Valorile inițiale aparțin mașinii reprezentative, din fabricația curentă, luată ca referință.

In toate cazurile posibile vom opera cu valori măsurate, sau mai exact cu valorile modul ale unei clase de experimente și nu cu valori calculate, fapt ce conferă o precizie ridicată metodei de calcul propuse în raport cu metoda clasică de calcul ai parametrilor fizici și de regim.

Spre exemplu, chiar în cazul cel mai simplu al determinării rezistenței îmfășurării unei mașini electrice apar erori între valoarea calculată și cea reală datorită necunoașterii exacte a diametrului conductorului utilizat la realizarea îmfășurării mașinii proiectate, acesta având admisă prin norme o anumită abatere de la valoarea nominală prescrisă.

Lucrînd cu valori măsurate și exprimînd parametrii fizici în unități relative posibilitatea apariției unor asemenea erori se exclude.

Considerînd în continuare cazul determinării rezistenței ohmice a îmfășurării dacă R_i este rezistența îmfășurării mașinii de referință la o lungime l_i a conductorului pentru nouă variantă având lungimea conductorului l , rezistența ohmică a îmfășurării este $R = R_i \frac{l}{l_i}$.

Se constată că procedînd astfel se elimină erorile datorită necunoașterii exacte a secțiunii conductorului.

Introducem următoarele notății.

l_1	- lungimea curentă a miezului magnetic, mm
l_{li}	- lungimea inițială a miezului magnetic mm
$k = \frac{l_1}{l_{li}}$	- lungimea relativă a miezului.
N_1	- numărul de spire pe o fază pentru varianta curentă;
N_{li}	- numărul inițial de spire pe o fază.
$n_1 = \frac{N_1}{N_{li}}$	- numărul relativ de spire pe o fază;
Q_1	- secțiunea curentă a cuprului, mm^2 ;
Q_{li}	- secțiunea inițială a cuprului, mm^2 ;
$q_1 = \frac{Q_1}{Q_{li}}$	- secțiunea relativă a cuprului;
$Y_1 = Y_{\text{opt}}$	- pasul curent de bobinaj = pasul optim;

y_{li} - pasul initial al înfășurării;

$y_l = \frac{Y_{opt}}{Y_{li}}$ - scurtarea relativă a pasului de bobinaj;

$l_{cl} = (k_p Y_{opt} + l_l)$ - lungimea curentă a conductorului, mm;

$l_{cli} = (k_p Y_{li} + l_{li})$ - lungimea initială a conductorului, mm.

OBS. - Se determină practic, pe bază de măsurători, în atelierul de bobinaj.

k_p - coeficient care ține seama de forma capătului de bobină;

$l_{sli} = 2 l_{cli}$ - lungimea initială a spirei, mm.

$a_l = \frac{l_{li}}{l_{sli}} = \frac{1}{2} - \frac{l_{fli}}{l_{sli}}$ - raportul dintre lungimea initială a conductorului din creștătură și lungimea initială a spirei.

$b_l = \frac{l_{fli}}{l_{sli}}$ - raportul dintre lungimea initială a capătului de bobină și lungimea initială a spirei

$i_{nl} = \frac{I_{nl}}{I_{nli}}$ - curentul nominal relativ;

$\Delta_l = \frac{k_{Bl}}{k_{Bli}}$ - coeficientul relativ de bobinaj;

$r_l = \frac{R_l}{R_{li}}$ - rezistența ohmică relativă a fazei;

$P_{cul} = \frac{P_{cu_1}}{P_{cu_{li}}}$ - pierderile relative în cupru.

2.3. Formule de extrapolare pentru parametrii fizici ai mașinii de inductie (în valori relative)

2.3.1. Rezistențe

2.3.1.1. Rezistență înfășurării statorice

Notății

P_{cu_1} - valoarea pierderilor în cupru la un moment dat (înțelegind prin aceasta valoarea pierderilor în cupru pentru o lungime oarecare a mașinii);

$P_{cu_{li}}$ - valoarea pierderilor în cupru initiale (pentru lungimea initială a mașinii).

Raportând $P_{cu_1}/P_{cu_{li}}$ obținem p_{cu_1} în valori relative, din care deducem rezistență înfășurării statorice tot ca o mărime relativă.

$$P_{cu_1} = \varrho \frac{2N_1}{Q_1} (k_p Y_{opt} + l_1) I_{nl}^2; \quad k_p - \text{coeficient ce ține seama de forma capului de bobină}; \quad (16)$$

$$P_{cu_{li}} = \varrho \frac{2N_{li}}{Q_{li}} (k_p Y_{li} + l_{li}) I_{nli}^2 = \varrho \frac{N_{li}}{Q_{li}} l_{sli} I_{nli}^2 \quad (17)$$

le raportăm și obținem :

$$\frac{P_{cu_1}}{P_{cu_{li}}} = \frac{N_1}{N_{li}} \frac{Q_{li}}{Q_1} \left(\frac{k_p Y_{opt}}{l_{sli}} + \frac{l_1}{l_{sli}} \right) \left(\frac{I_{nl}}{I_{nli}} \right)^2 \quad (18)$$

sau:

$$P_{cu} = 2 \frac{N_1}{N_{li}} \cdot \frac{Q_{li}}{Q_1} \left(\frac{k_p Y_{li}}{l_{sli}} \cdot \frac{Y_{opt}}{Y_{li}} + \frac{l_{li}}{l_{sli}} \cdot \frac{l_1}{l_{li}} \right) \left(\frac{I_{nl}}{I_{nli}} \right)^2 \quad (18.1)$$

Făcînd înlocuirile în (18.1) obținem :

$$P_{cu_1} = 2 \frac{n_1}{q_{1r}} (k a_1 + b_1 y_1) i_{ln}^2 \quad (18.2)$$

deci:

$$r_1 = 2 \frac{n_1}{q_1} (k a_1 + b_1 y_1) \quad (19)$$

Din considerente de economia lucrării nu vom proceda în extenso la stabilirea relațiilor de extrapolare pentru ceilalți parametrii fizici ai mașinii întrucît procedura este oarecum similară.

2.3.1.2. Rezistența înfășurării rotorice (rotor în scurt circuit)

Pierderile curente în rotor.

$$P_{cu_2} = m_1 I_{nl}^2 R_2' ; \quad (20)$$

R_2' - rezistență rotorică raportată la stator.

Făcînd înlocuirile și calculele intermediare obținem:

$$P_{cu_2} = n_1^2 \Delta_1^2 i_{ln}^2 (k r_{2bi} + r_{2f}) \quad (21)$$

$$r_2' = n_1^2 \Delta_1^2 (k r_{2bi} + r_{2f}) \quad (22)$$

2.3.2. Reactante

2.3.2.1. Reactanța statorică

Reactanța curentă se calculează cu relația:

$$x_1 = 0,158 \left(\frac{f_1}{100} \right) \left(\frac{N_1}{100} \right)^2 \frac{1_1}{p q_1} (\lambda_{cl} + \lambda_{fl} + \lambda_{dl}) 10^{-1} \quad (23)$$

q_1 - numărul de crestături pe pol și fază;

λ_{cl} - permeanța crestăturii;

λ_{fl} - permeanța scăpărilor frontale;

λ_{dl} - permeanța scăpărilor diferențiale.

Valoarea inițială a reactanței statorice are o expresie analogă. Făcînd raportul lor obținem reactanța în valori relative:

$$x_1 = \frac{x_1}{x_{li}} = \frac{x_{lcd}}{x_{li}} n_1^2 k + \frac{x_{lf}}{x_{li}} n_1^2 y_1 \quad (24)$$

notînd:

$$x_{lcd} = \frac{x_{lcd}}{x_{li}} = \frac{\lambda_{cl} + \lambda_{dl}}{\lambda_{cli} + \lambda_{dli} + \lambda_{fli}} \quad (25)$$

$$x_{lf} = \frac{x_{lf}}{x_{li}} = \frac{\lambda_{fl}}{\lambda_{cli} + \lambda_{dli} + \lambda_{fli}} \quad (26)$$

putem scrie:

$$x_1 = n_1^2 (x_{lcd} k + x_{lf} y_1) \quad (27)$$

tinînd seama că:

$$\lambda_{cl} = \lambda_{cli}$$

$$\lambda_{dl} = \Delta_1^2 \lambda_{dli} \quad (28)$$

$$\lambda_{fl} = \frac{y}{k} \lambda_{fli}$$

2.3.2.2. Reactanta rotorului

$$x_2 = 7,9 f_1 l_1 (\lambda_{c2} + \lambda_{d2} + \frac{\lambda_{f2}}{l_1}) 10^{-9} = 7,9 f_1 l_1 (\lambda_{c2} + \lambda_{d2}) +$$

$$+ 7,9 f_1 \lambda_{f2} 10^{-9} = 7,9 f_1 (\lambda_{c2} + \lambda_{d2}) l_{1i} \frac{l_1}{l_{1i}} 10^{-9} + \\ + 7,9 f_1 \lambda_{f2} 10^{-9} \quad (29)$$

Notăm:

$$x_{2cd} = 7,9 f_1 (\lambda_{c2} + \lambda_{d2}) l_{1i} 10^{-9} \quad (30)$$

$$x_{2f} = 7,9 f_1 \lambda_{f2} 10^{-9} \quad (31)$$

respectiv:

$$x_{2cd} = \frac{x_{2cd}}{x_{2i}} = \frac{\lambda_{c2} + \lambda_{d2}}{\lambda_{c2i} + \lambda_{d2i} + \lambda_{f2i}} \quad (32)$$

$$x_{2f} = \frac{x_{2f}}{x_{2i}} = \frac{\lambda_{f2}}{\lambda_{c2i} + \lambda_{d2i} + \lambda_{f2i}} \quad (33)$$

cum:

$$\lambda_{c2} = \lambda_{c2i}$$

$$\lambda_{d2} = \lambda_{d2i}; x_2 = \frac{x_2}{x_{2i}} = \frac{x_{2cd}}{x_{2i}} k + \frac{x_{2f}}{x_{2i}} = x_{2cd} k + x_{2f} \quad (34)$$

$$\lambda_{f2} = k \cdot \lambda_{f2i}$$

Reactanță redusă la stator:

$$x_2' = \frac{x_2'}{x_{2i}} = \frac{\frac{4 m_1 (w_1 k_{bl})^2}{z_2}}{\frac{4 m_1 (w_{1i} k_{Bli})^2}{z_2}} \cdot \frac{x_2}{x_{2i}} = n_1^2 \Delta_1^2 x_2 \quad (35)$$

$$x_2' = n_1^2 \Delta_1^2 (x_{2cd} \cdot k + x_{2f}) \quad (36)$$

2.3.2.4. Reactanță de scurtcircuit

$$x_{sc} = x_1' + x_2' = n_1^2 (x_{1cd} \cdot k + x_{1f} \cdot y) + n_1^2 \Delta_1^2 (x_{2cd} \cdot k + x_{2f}) \quad (37)$$

$$x_{sc} = n_1^2 \left[(x_{1cd} + \Delta_1^2 x_{2cd}) \cdot k + x_{1f} \cdot y + x_{2f} \right] \quad (38)$$

2.3.3. Parametrii regimului de mers în scurtcircuit

2.3.3.1. Curentul nominal de scurtcircuit

$$I_{scn} = \frac{U_{scn}}{Z_{scn}} \quad (39)$$

Făcind înlocuirile respective obținem:

- pentru motor cu rotor în scurtcircuit:

$$i_{sc} = \frac{I_{scn}}{I_{scni}} = \frac{\frac{U_{scn}}{U_{scni}}}{\frac{Z_{scn}}{Z_{scni}}} = \frac{u_{scn}}{z_{scn}} =$$

$$= \frac{u_{scn}}{\sqrt{\left[2 \frac{n_1}{q_1} (k a_1 + b_1 y_1) + (n_1 \Delta_1)^2 (r_2 b_i k + r_2 f) \right]^2 +}} \dots$$

$$\dots \frac{u_{scn}}{\sqrt{\left[n_1^2 (x_{1cd} + \Delta_1^2 x_{2cd}) k + x_{1f} y + x_{2f} \right]^2}} \quad (40)$$

2.3.3.2. Puterea la scurtcircuit nominal de probă

$$P_{scn} = P_{cu_1} + P_{cu_2} \quad (41)$$

$$P_{scn} = 2 \frac{n_1}{q_1} (k a_1 + b_1 y_1)^2 i_{ln}^2 + (n_1 \Delta_1)^2 (r_2 b_i k + r_2 f) i_{ln}^2 \quad (41.2)$$

2.3.4. Parametrii circuitului de magnetizare

Din cauza caracterului neliniar, nu are sens un calcul analitic a parametrilor circuitului de magnetizare, ci se va pleca de la caracteristica relativă și medie a încercărilor de mers în gol.

2.3.4.1. Curentul de mers în gol

Curba medie a curentului de mers în gol poate fi exprimată analitic prin relația :

$$I_o \approx I_{on} = C_o \frac{U_H}{N_1 k_{Bl}} = C_o \frac{f(B_\delta)}{N_1 k_{Bl}} ; \quad (42)$$

OBS. - Se negligează componenta activă (I_{oa}) .

$$C_o = \frac{p}{0,9 m_1} \quad (42.1)$$

U_H - tensiunea magnetomotoare totală;

N_1 - numărul de spire pe fază;

k_{Bl} - factorul de bobinaj

B_δ - inducția (în întrefier)

$$B_\delta = \frac{\frac{\pi}{2} \emptyset_1}{\frac{\pi}{2} l_1} = \frac{\frac{\pi}{2} U_{el}}{4,44 f_1 N_1 k_{bl} \frac{\pi}{2} l_1} \quad (42.2)$$

$$I_o \approx C_{ol} \frac{f_o(N_1, k_{Bl}, l_1)}{N_1 k_{Bl}} \quad (42.3)$$

$$C_{ol} = \frac{\frac{\pi}{2} U_{el} C_o}{2 \cdot 4,44 f_1} \quad (42.3.1)$$

$$I_{oi} = C_{ol} \frac{f_o(N_{li}, k_{Bli}, l_{li})}{N_{li} k_{Bli}} \quad (43)$$

$$i_o = \frac{I_o}{I_{oi}} = \frac{\frac{f_o(N_1, k_{Bl}, l_1)}{N_1 k_{Bl}}}{\frac{f_o(N_{li}, k_{Bli}, l_{li})}{N_{li} k_{Bli}}} = \frac{\frac{f_o(N_1, k_{Bl}, l_1) \frac{N_1, k_{Bl}, l_1}{N_{li}, k_{Bli}, l_{li}}}{f_o(N_{li}, k_{Bli}, l_{li})}}{\frac{N_1 k_{Bl}}{N_{li} k_{Bli}}} \quad (44)$$

Cu notăriile anterioare, scriem:

$$i_0 = \frac{f_0(N_{li} k_{Bli} l_{li} \cdot n_1 \Delta_1)}{f_0(N_{li} k_{Bli} l_{li})} \cdot \frac{N_{li} k_{Bli}}{N_1 k_{Bl}} \quad (44.1)$$

Notând în continuare:

$$n_1 \Delta_1 = \frac{1}{\alpha}; \quad (44.1.1)$$

și având în vedere că produsul $N_{li} k_{Bli} l_{li}$ este aici o constantă, putem scrie mai departe:

$$i_0(\alpha) = \frac{f_0(N_{li} k_{Bli} l_{li} \frac{1}{\alpha})}{f_0(N_{li} k_{Bli} l_{li})} = f(\alpha) \quad (44.1.2)$$

și prin urmare:

$$i_0 = \frac{1}{n_1 \Delta_1} i'_0(\alpha) \quad (44.2)$$

Întrucît:

$$U_{el} = f_1(N_1 k_{Bl} l_1) \quad (45)$$

(OBS. - la f_1 și B constante)

$$U_{eli} = f_1(N_{li} k_{Bli} l_{li})$$

se deduce că raportul:

$$\frac{U_{el}}{U_{eli}} = f_1(\alpha) \text{ deci și } \frac{U_1}{U_{li}} = f_1(\alpha) \quad (45.1)$$

Dacă se consideră $U_{li} = U_{1N}$ (tensiunea nominală de alimentare) se ajunge la concluzia finală :

$$i'_o(\alpha) = f(\alpha) = f\left(\frac{U_1}{U_{1N}}\right) \quad (46)$$

Se va ridica experimental caracteristica:

$i'_o(\alpha) = f\left(\frac{U_1}{U_{1N}}\right)$, pentru motoare din fabricația curentă și se va calcula coeficientul $\alpha = \frac{1}{n_1 \Delta_1 k}$.

Pentru acest α calculat se va scoate din caracteristică valoarea corespunzătoare a lui $i'_o(\alpha)$ putîndu-se astfel determina $i_o = \frac{1}{n_1 \Delta_1} i'_o(\alpha)$.

In fig. (1) este ridicată caracteristica $i'_o(\alpha) = f\left(\frac{U_o}{U_{on}}\right)$ pentru un motor de 22 kW r/m, pe aceeași diagramă este ridicată și caracteristica $p'_o(\alpha) = f_2\left(\frac{U_o}{U_{on}}\right)$, descrisă în paragraful următor.

2.3.4.2. Puterea de mers în gol

Puterea de mers în gol se poate exprima printr-o relație de forma:

$$P_o = k_o M_{Fe} f(B_g^2) \quad (47)$$

unde:

k_o - constantă

$$M_{Fe} = \gamma_{Fe} V_{Fe} = \gamma_{Fe} S_{Fe} l_1$$

este masa fierului statoric

S_{Fe} - suprafața tolei

$$B_g = f(N_1, k_{Bl}, l_1)$$

deci:

$$P_0 = k_0 \gamma_{Fe} S_{Fe} l_1 f(N_1, k_{Bl}, l_1)^2 \quad (47.1)$$

Puterea de mers în gol initială

$$P_{oi} = k_0 \gamma_{Fe} S_{Fe} l_{li} f(N_{li}, k_{Bli}, l_{li})^2 \quad (48)$$

Făcînd raportul lor obținem :

$$P_0 = \frac{P_0}{P_{oi}} = \frac{l_1}{l_{li}} \cdot \frac{f(N_{li} k_{Bli} l_{li})^2}{f(N_{li} k_{Bli} l_{li})^2} \quad (49)$$

Cu notatiile de la § 2.3.4.1. știind că:

$N_{li} k_{Bli} l_{li} = ct$, putem scrie :

$$P_0 = k p'_0 (\alpha) \text{ unde } p'_0 (\alpha) = f_2 (\alpha)$$

Cunoaștem de asemenea faptul că :

$$p'_0 (\alpha) = f_3 \left(\frac{U_1}{U_{LN}} \right)$$

Pentru determinarea p_0 vom ridica experimental curba $p'_0 (\alpha) = f_3 \left(\frac{U_1}{U_{LN}} \right)$ - fig. (1) - și calculăm pe k .

Din caracteristica determinată $p'_0 (\alpha)$ pentru

$$\alpha = \frac{1}{n_1 \Delta_1 k} \text{ și astfel obținem } p_0 = k p'_0 (\alpha).$$

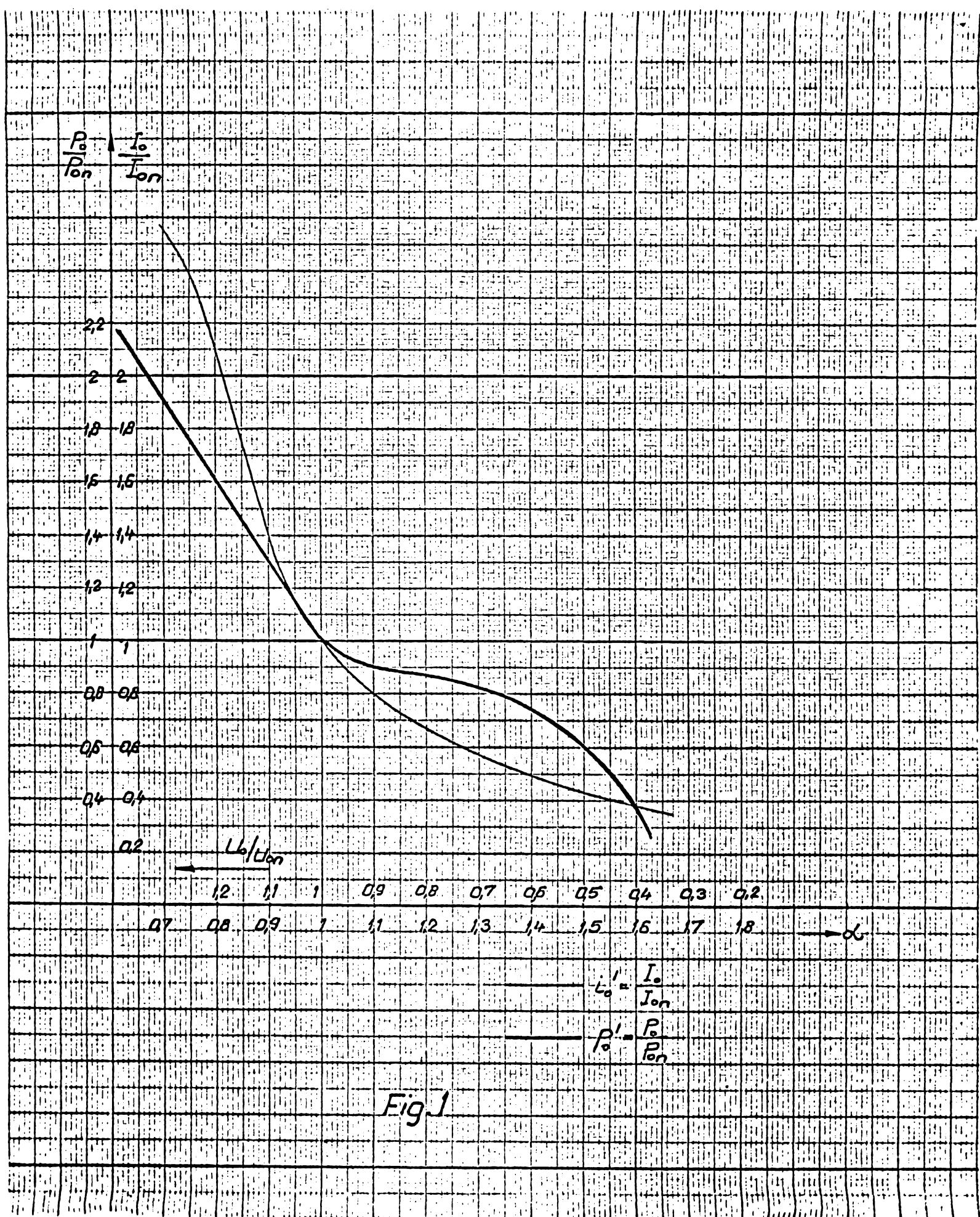


Fig. 1

2.4. Calculul costurilor si economiilor

2.4.1. Costul miezurilor de fier

$$C_{Fe} = M_{Fe} \rho_{Fe} = \gamma_{Fe} s_{Fe} l_1 \rho_{Fe} \quad (50)$$

$$C_{Fei} = M_{Fei} \rho_{Fe} = \gamma_{Fe} s_{Fe} l_{li} \rho_{Fe} \quad (51)$$

unde:

M_{Fe} - masa fierului variantei curente;

M_{Fei} - masa fierului variantei initiale;

ρ_{Fe} - costul unității de masă a fierului;

putem scrie:

$$C_{Fe} = C_{Fei} \frac{l_1}{l_{li}} = C_{Fei} k \quad (52)$$

2.4.2. Costul cuprului

$$C_{cul} = \frac{V_{cul}}{V_{culi}} C_{culi} = \frac{n_1 Q_1 2(a_1 k + y_1 b_1)}{n_{li} Q_{li} l_{sli}} C_{culi}$$

$$= n_1 q_1 (a_1 k + y_1 b_1) C_{culi} \frac{l_{sr}}{l_{sr}} \quad (53)$$

2.4.3. Costul aluminiului

Analog obținem :

$$C_{Al} = (a_2 k + b_2) C_{Ali} \quad (54)$$

2.4.4. Calculul economiilor

$$E = C_i - C \quad (55)$$

unde:

C - costul variantei curente (optimizate);

C_i - costul variantei inițiale;

$$C = C_{Fe} + C_{Cu} + C_{Al} \quad (56)$$

$$C_i = C_{Fei} + C_{Culi} + C_{Ali} \quad (57)$$

Economia relativă (exprimată procentual):

$$\epsilon \% = \frac{C_i - C}{C_i} \cdot 100 = \left(1 - \frac{C}{C_i}\right) \cdot 100 \quad (58)$$

2.5. Prelucrarea datelor obținute la încercările de tip

In cadrul probelor de tip se determină, în principal, următorii parametrii ai mașinii:

R_{fr} - rezistența fazei la rece (temperatura ambientă);

R_{fc} - rezistența fazei la cald (la $75^{\circ}C$);

I_{on} - curentul de mers în gol nominal $U_{l0} = U_{ln}$ (se ridică și curba $I_o = f_1(U_{l0})$)

P_{on} - pierderile de mers în gol nominal (se ridică curbă $P_o = f_2(U_{l0})$)

P_{m+v} - pierderile mecanice și prin ventilație;

P_{Fe} - pierderile în fier;

$\cos \varphi_0$ - factorul de putere la mers în gol;

U_{sc} - tensiunea de scurtcircuit (pentru $I_{lsc} = I_{ln}$);

I_{sc} - curentul de scurtcircuit;

P_{sc} - pierderile la scurtcircuit;

M_p - cuplul de pornire, respectiv $k_{Mp} = \frac{M_p}{M_N}$;

I_p - curentul de pornire, respectiv $k_{Ip} = \frac{I_p}{I_{ln}}$;

M_m - cuplul maxim, respectiv $k_{Mm} = \frac{M_m}{M_N}$;

P_{Cu1} - pierderile în bobinajul statoric la regim nominal;

P_{Cu2} - pierderile în bobinajul rotoric la regim nominal;

$P_{supl.n}$ - pierderile suplimentare la regim nominal;

P_{an} - puterea absorbită la regim nominal;

I_{ln} - curentul absorbit la regim nominal;

S_n - alunecarea nominală;

η_n - randamentul nominal;

$\cos \varphi_n$ - factorul de putere nominal;

θ_n - încălzirea la regim nominal.

Mărimele marcate, prin subliniere, le alegem drept parametrii, în procedura de optimizare stochastică - extrapolativă, întrucât aceste mărimi definesc performanțele mașinii fiind totodată valori prescrise în standarde.

Aveam deci următorii șase parametrii:

$\eta_n, \theta_n, \cos \varphi_n, k_{Ip}, k_{Mp}, k_{Mm}$.

Relațiile de calcul, conținând o parte din mărimele fizice ale mașinii, relații care determină valoarea parametrilor de regim, le denumim criterii.

Avem următoarele şase criterii corespunzînd în ordine celor şase parametrii:

$$C_{\eta}, C_{\theta}, C_{\varphi}, C_{Ip}, C_{Mp}, C_{Mm}$$

Expresiile criteriilor sunt:

$$(1) \quad C_{\eta} = P_{oN} + P_{scN} = P_{oN} + P_{sc} \left(\frac{I_{1N}}{I_{sc}} \right)^2 \quad (59)$$

$$(2) \quad C_{\theta} = P_{oN} + P_{sc} \left(\frac{I_{1N}}{I_{sc}} \right)^2 \quad (60)$$

$$(3) \quad C_{\varphi} = \frac{I_{sc}}{I_o^2} \quad (61)$$

$$(4) \quad C_{Ip} = I_{sc} \quad (62)$$

$$(5) \quad C_{Mp} = P_{Cu2} = P_{sc} - 3 I_{sc}^2 R_1 \quad (63)$$

$$(6) \quad C_{Mm} = \frac{I_{sc}}{I_o} \quad (64)$$

OBS. - Criteriile conțin mărimile fizice măsurate, sau relațiile între acestea, de care depind parametrii respectivi.

Pe baza tuturor probelor de tip existente (minim cinci) se determină dependența stochastică parametru - criteriu și se reprezintă dreptele de regresie pentru fiecare pereche parametru - criteriu (η ; C_{η} ; θ ; C_{θ} ; etc).

Pentru reprezentarea grafică a dreptelor de regresie se determină:

- coeficientul unghiular (m) al dreptei;
- un punct prin care trece dreapta de regresie.

Punctul prin care trece dreapta de regresie este caracterizat prin coordonatele (\bar{X} , \bar{Y}), adică dreapta trece prin centrul distribuției.

Pentru determinarea coordonatelor \bar{X} , \bar{Y} , utilizăm relațiile:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^p X_i}{p} \text{ - valoarea medie a parametrului} \quad (65)$$

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^p Y_i}{p} \text{ - valoarea medie a criteriului} \quad (66)$$

p - numărul probelor

Pentru determinarea coeficientului unghiular al dreptei de regresie folosim relația:

$$m = R \sqrt{\frac{S_Y}{S_X}} \quad (67)$$

în care:

$$R = \frac{S_{XY}}{\sqrt{S_X \cdot S_Y}} \text{ - coeficient de corelație;} \quad (68)$$

$$S_X = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (69)$$

$$S_X = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (70)$$

$$S_{XY} = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) \quad (71)$$

OBS. - Dreapta de regresie ilustrează legătura dintre parametru și criteriu. Este însă necesar să se caracterizeze și intensitatea legăturii, adică gradul împrăștierii valorilor parametrului X_i în jurul dreptei de regresie. Cu cît această împrăștiere este mai mică, cu atât se pot prevede

cu mai multă certitudine, pe baza ec. de regresie, valoile caracteristicii X_i pentru anumite valori determinate ale caracteristicilor Y_i . În general, intensitatea corelației se caracterizează cu ajutorul raportului de corelație, care în cazul corelației liniare se transformă în coeficient de corelație.

Coefficientul de corelație are valori cuprinse între - 1 și + 1, adică $-1 \leq R \leq +1$; dacă între caracteristicile X_i și Y_i există o legătură funcțională, coefficientul de corelație este egal cu 1. (în valoare absolută).

Dacă $R \rightarrow 0$ se poate trage concluzia că corelația liniară este slabă sau chiar inexistentă. Cu cît $R \rightarrow 1$ sau -1 , cu atât corelația liniară este mai strânsă.

Dacă R are semnul plus, corelația este directă, (adică pe măsura creșterii valorilor unei caracteistică cresc și valorile celeilalte) iar dacă R are semnul minus, corelația este inversă (ceea ce înseamnă că pe măsura creșterii valorilor unei caracteistică scad valorile celeilalte caracteistică).

Ecuatia dreptei astfel determinată este :

$$X - \bar{X} = m (Y - \bar{Y}) \quad (72)$$

Avem perechile (X_i, Y_i) după cum urmează :

$$(\eta_i, c_{\eta_i}); \quad (\theta_i, c_{\theta_i}); \quad (\cos \varphi_i, c_{\varphi_i});$$

$$(K_{Ipi}, c_{Ipi}); \quad (K_{Mpi}, c_{Mpi}); \quad (K_{Mmi}, c_{Mmi}).$$

Aici $i = 1, \dots, p$; unde p reprezintă numărul probelor de tip.

Având determine mărimile de mai sus, în continuare vom reprezenta grafic ecuația dreptei de regresie pentru fiecare din cele sase cupluri parametru - criteriu.

Obținem grafice ca în figura (2).

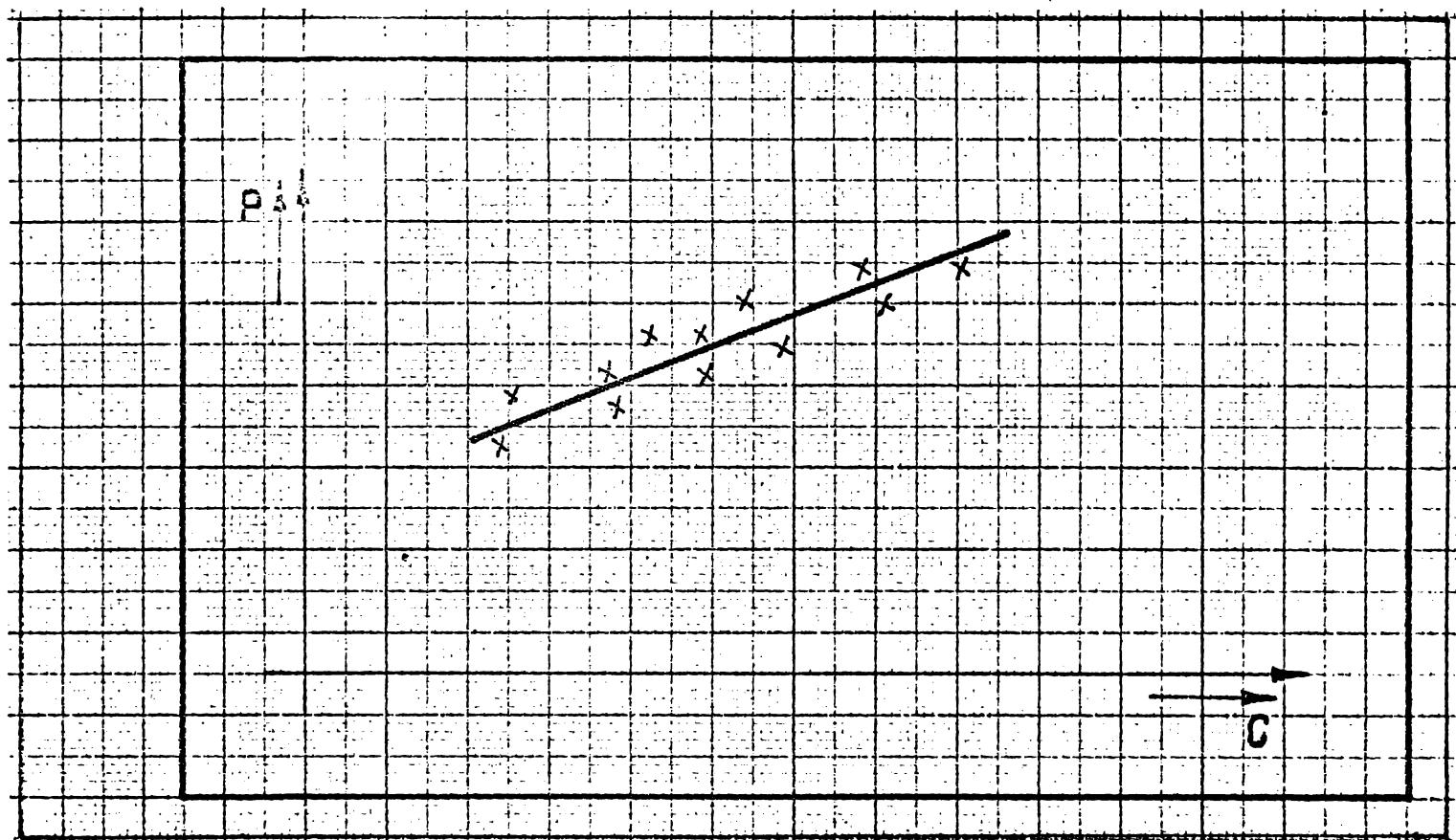


Fig. 2

In continuare, tot pe baza probelor de tip efectuate pe motoare din seria actuală se determină:

(a). variația parametrilor de mers în gol, calculind valorile medii ale rezultatelor tuturor probelor (min.5) reprezentîndu-se curbele $i'_o = f_1(\alpha)$ și $p'_o = f_2(\alpha)$.

Pentru calculul lui α se folosește relația :

$$\alpha_i = \frac{U_o(i)}{U_N} ; \text{ cu } i = 1, \dots, 10$$

$$U_o(i) = 100, 150, 200, 250, 300, 350, 380, 400, 425, 450 \text{ V}$$

$$U_N = 380 \text{ V.}$$

Pentru calculul valorii medii a lui i'_0 se foloseste relația:

$$i'_0 (\alpha_i) = \frac{\sum_{1}^p I_{oi}}{\frac{p}{\sum_{1}^p I_{oN}}} = \frac{\sum_{1}^p I_{oi}}{\frac{1}{\sum_{1}^p I_{oN}}} \quad (73)$$

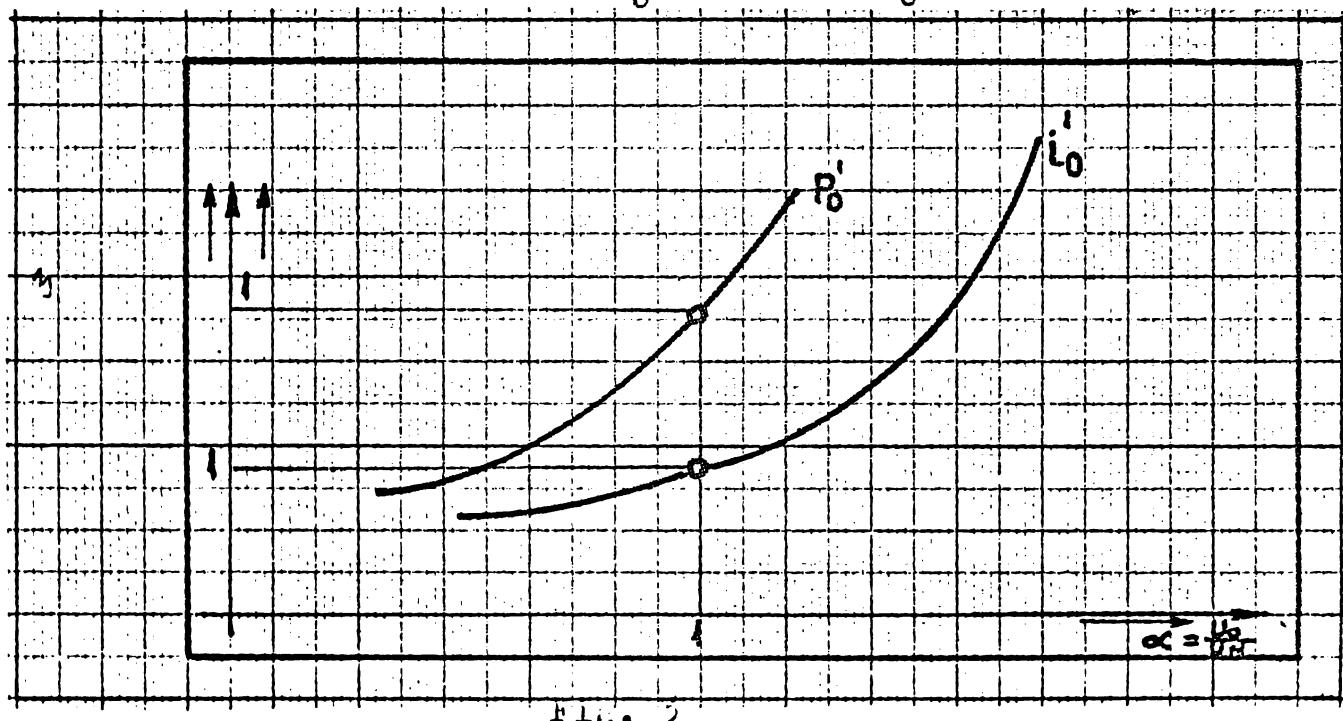
$$i = 1, \dots, 10$$

p - numărul probelor de tip;

I_{oN} - I_0 măsurat la U_N .

Calculul valorilor medii ale lui p'_0 se face analog cu cel pentru i'_0 .

Se trasează curbele $i'_0 (\alpha)$ și $p'_0 (\alpha)$ - fig. (3).



(b). Tot din probele de tip se determină valorile medii pentru următoarele mărimi:

$$I_N^*; R_1^*; R_2^*; \left(\frac{R_2}{R_{sc}}\right)^* = 1 - \frac{R_1^*}{R_{sc}^*}; \left(\frac{P_{Cu1}}{P_{sc}^*}\right)^*; \left(\frac{P_{Cu2}}{P_{sc}^*}\right)^*;$$

$$\left(\frac{P_{Cu2}}{P_{sc}^*}\right)^* = 1 - \frac{P_{Cu1}^*}{P_{sc}^*}; \frac{X_1^*}{X_{sc}^*}; \frac{X_2^*}{X_{sc}^*} = 1 - \frac{X_1^*}{X_{sc}^*}$$

cu relația de forma :

$$I_N^* = \frac{\sum_{j=1}^p I_{Nj}}{p}, \text{ etc.} \quad (74)$$

unde:

p - numărul probelor de tip.

2.6. Prelucrarea probelor de serie

Pe baza a 30 - 100 probe de serie se determină valorile cele mai probabile (modul) calculate ca medii aritmetice pentru:

$$P_0^*; I_0^*; P_{sc}^*; P_{cul}^* = \left(\frac{P_{cul}}{P_{sc}^*}\right)^* P_{sc}^*; P_{Cu2}^* = \left(\frac{P_{Cu2}}{P_{sc}^*}\right)^* P_{sc}^*;$$

respectiv se calculează:

$$c_{\eta}^*; c_{\theta}^*; c_{\varphi}^*; c_{Ip}^*; c_{Mp}^*; c_{Mm}^*$$

Pe baza acestor date se determină, din fig. (2), valoriile cele mai probabile (modul) ale parametrilor seriei curente în fabricație, respectiv :

$$\gamma^*; \theta^*; \cos \varphi^*; K_{Ip}^*; K_{Mp}^*; K_{Mm}^*$$

OBS. - Determinarea valorilor modul ale parametrilor seriei din fabricație se poate face din fig. (2) sau, cunoscând ecuația dreptei de regresie, cu relația :

$$\bar{x}_k^* = (\bar{c}_k^* - \bar{c}_k^*) m_k + \bar{x}_k^* \quad (75)$$

unde:

$$k = 1, \dots, 6$$

\bar{x}_k^* - valoarea medie a parametrului calculat la probele de serie;

\bar{c}_k^* - valoarea medie a criteriului corespunzător fiecărui parametru (calculat la probele de serie);

\bar{c}_k - idem - (calculat la probele de tip);

m_k - coeficienții unghiulari ai dreptei de regresie;

\bar{x}_k - valoarea medie a parametrului, calculată la probele de tip;

OBS. - Cu \bar{x} s-a cotat valoarea medie la probele de tip;

Cu \bar{c} s-a notat valoarea medie la probele de serie.

Toate aceste date folosesc pentru:

1. determinarea coeficientilor de corelație pentru relațiile metodelor clasice de proiectare;
2. ca date de plecare pentru metoda extrapolativă.

Cu formulele stabilite în paragraful C.2.1. - C.2.4. și cu valorile modul determine pe baza probelor de tip și de lot se calculează valorile parametrilor fizici ai noi variante pentru un k , n_1 , a_1 , alegi.

2.7. Calculul parametrilor fizici pentru noua variantă
(notăm cu \bar{x})

2.7.1. Calculul rezistențelor

$$\bar{R}_1 = r_1 R_1^* \quad (76)$$

$$\bar{R}'_2 = r_2 R'_2^* \quad (77)$$

2.7.2. Calculul reactanțelor

$$\bar{X}_1 = x_1 X_1^* \quad (78)$$

$$X'_2 = x_2 X'_2^* \quad (79)$$

2.7.3. Curentul de scurtcircuit

$$\bar{I}_{sc} = \frac{U_{sc}}{\sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2}} \quad (80)$$

2.7.4. Calculul pierderilor în cupru stator și aluminiu rotor

$$\bar{P}_{Cu1} = P_{Cu1} P_{Cu1}^* \quad (81)$$

$$\bar{P}_{Cu2} = P_{Cu2} P_{Cu2}^* \quad (82)$$

2.7.5. Calculul curentului de mers în gol

$$i_o = \frac{1}{n_1 \Delta_1} i'_o(\alpha) \quad (i'_o(\alpha) \text{ din grafic fig. (3)})$$

$$I_o = i_o I_o^* \quad (83)$$

- - -
 2.7.6. Calculul puterii de mers în gol

$$p_0 = k p'_0 (\alpha) \quad (p'_0 (\alpha) \text{ din grafic fig. (3)})$$

$$\bar{P}_0 = p_0 \frac{\bar{I}^*}{I_N} \quad (84)$$

2.7.7. Calculul puterii la scurtcircuit

$$\bar{P}_{sc} = (\bar{P}_{Cu1} + \bar{P}_{Cu2}) \left(\frac{\bar{I}_{sc}}{I_N^*} \right)^2 \quad (85)$$

2.8. Calculul criteriilor și a parametrilor noii variante precum și economiile realizate

$$\bar{C}_{\eta, \theta} = \bar{P}_0 + \bar{P}_{sc} \left(\frac{\bar{I}_n}{\bar{I}_{sc}} \right)^2 \quad (86)$$

$$\bar{C}_\varphi = \frac{\bar{I}_{sc}}{\bar{I}_0^2} \quad (87)$$

$$\bar{C}_{Ip} = \bar{I}_{sc} \quad (88)$$

$$\bar{C}_{Mp} = \bar{P}_{Cu2} \quad (89)$$

$$\bar{C}_{Mm} = \frac{\bar{I}_{sc}}{\bar{I}_0} \quad (90)$$

2.8.1. Determinarea parametrilor modul ai noii variante

Având valorile criteriilor \bar{C} , se citesc din fig. (2), $\bar{P} = f(\bar{C})$, valorile modul ale parametrilor variantei.

$$\bar{\eta}, \bar{\theta}, \bar{\cos \varphi}, K_{Ip}, K_{Mp}, K_{Mm}.$$

2.8.2. Calculul economiilor realizate prin noua variantă

Se efectuează cu relațiile de la C.2.4.

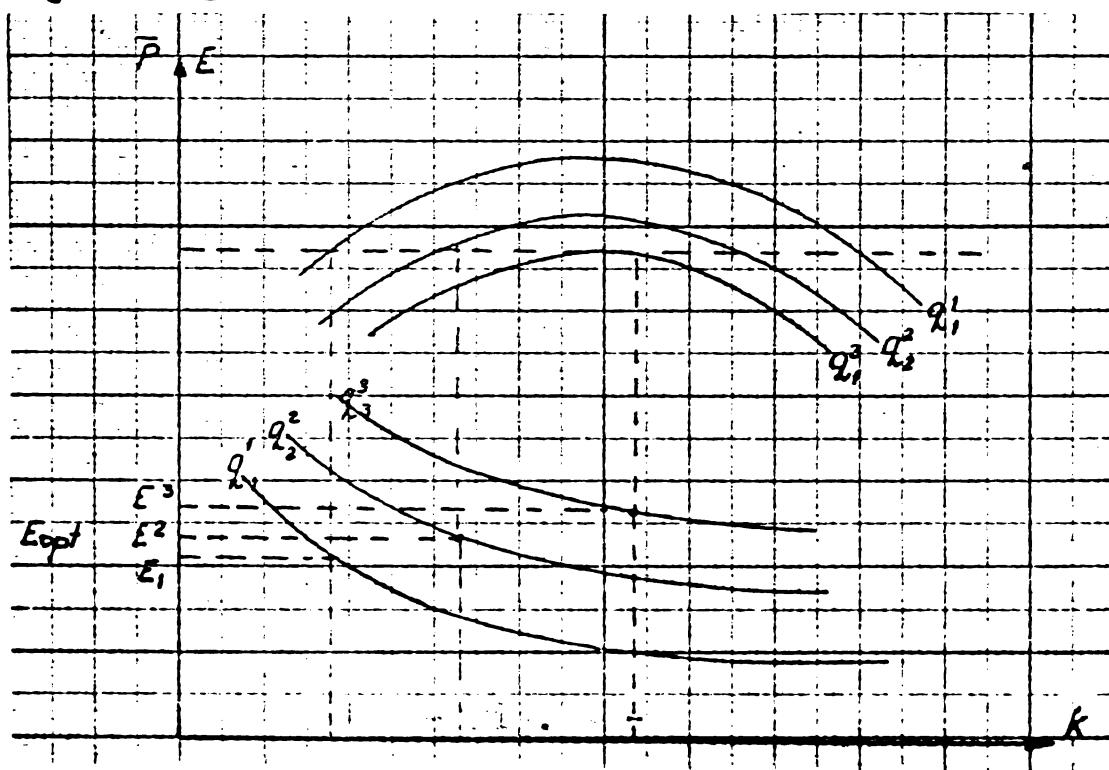
2.9. Calculul variantei optime

Așa cum s-a arătat la început, pentru limitarea numărului de variante se alege drept variabilă curentă lungimea relativă a miezului magnetic, atribuindu-i valori discrete în salturi de 1 - 5 % în domeniul (75% - 125%) l_1 , precum și numărul relativ de spire în crestătura n_1 respectiv secțiunea relativă a cuprului q_1 , mărimi cuantizate ce variază în limite restrânse, scurtarea pasului înfășurării se elimină ca parametru adoptându-se y_{opt} .

Valoarea limită admisibilă pentru mărimea standardizată calculată ca modul se adoptă ca limită unilaterală de dispersie tehnologică (2σ) astfel ca întreaga serie să se înscrie în limitele de toleranțe cu o siguranță de 97,5 %.

Pentru ușurință interpretării se determină parametrul calculat ca modul (P) și economia realizată (E) pentru fiecare variantă funcție de lungimea relativă (k) cu n_1 ca parametru principal și cu q_1 ca parametru de familie.

Prin reprezentarea grafică direct pe calculator se obține imediat optimul (local) $f(k)$ și $q_1 \text{ opt}$ (q_1 parcurgând un număr relativ mic de valori discrete $q_1^1, q_1^2, q_1^3 \dots$) corespunzător la un n_1 dat și economiile realizate față de motorul de referință (fig. 4).



Prin listarea finală a variantelor cu optime locale la un n_1 dat se obține dependența $E_{opt} = f(n_1)$ (fig.5) din care se alege soluția optimă cu E_{max} iar din listarea anterioară se determină k_{opt} și $a_{l \neq opt}$.

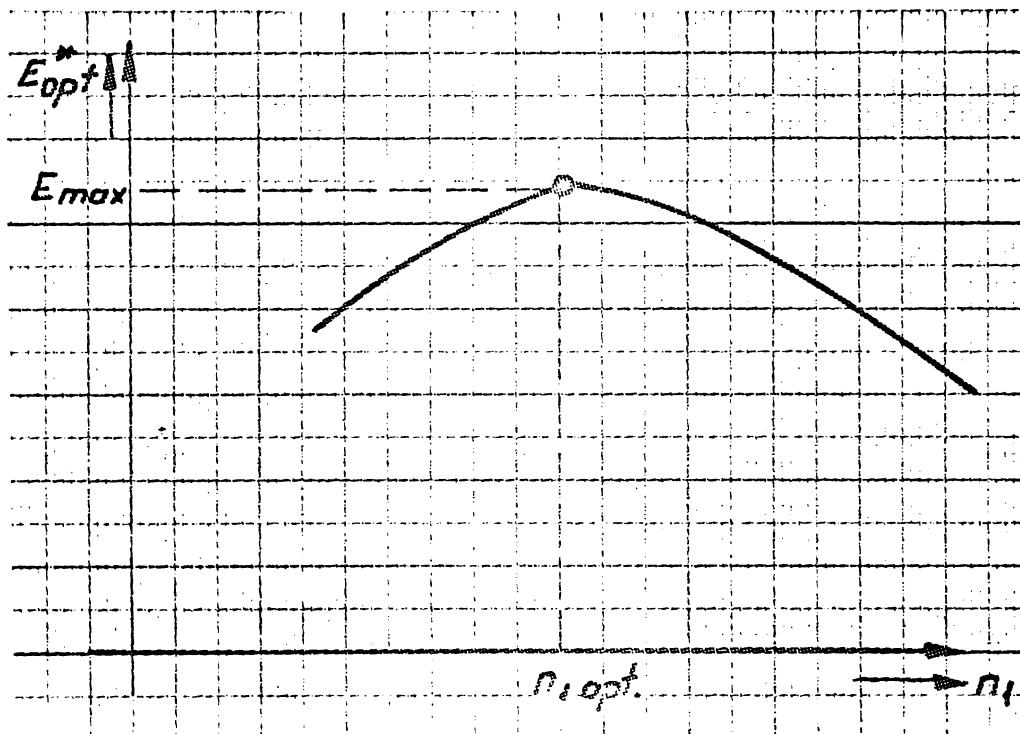


Fig. 5

In anexa 5 se prezintă schema logică bloc a programului pentru calculator, precum și economiile postcalculate pentru un caz concret de aplicare (anexa 6).

CAP.D. PROGRAMAREA NELINIARA. METODE SI TEHNICI SPECIFICE

Consideratii generale

Așa cum s-a mai spus anterior și după cum se va vedea în cele ce urmează, optimizarea generală a proiectării motorului de inducție este o problemă tipică de programare neliniară cu restricții deasemenea neliniare, unde atât funcția de optimizat cât și restricțiile sunt funcții de mai multe variabile.

Cu alte cuvinte, optimizarea proiectării motorului de inducție, reprezintă cazul cel mai general de programare neliniară.

Programarea matematică este o ramură a cercetării operaționale care se ocupă cu problemele generale ale optimizării adică cu determinarea extremului (maximului și minimului) unei funcții de mai multe variabile.

Programarea neliniară, cel mai recent domeniu al programării matematice, studiază și elaborează în cazul cel mai general metode de găsirea optimului unei funcții neliniare denumită funcție obiectiv sau funcție de scop, în care variabilele sunt supuse unor restricții, în general neliniare, care determină un anumit domeniu din spațiul euclidian n - dimensional (R^n).

Funcția obiectiv și restricțiile trebuie să fie continue și diferențiable iar derivatele de ord. I și II continue.

In unele cazuri practice se mai introduce condiția suplimentară ca funcția obiectiv și funcțiile de constrințe să fie funcții convexe sau concave.

Din punct de vedere al condițiilor initiale metodele de programare neliniară se împart în două categorii:

1. Metode de programare neliniară fără restricții.
2. Metode de programare neliniară cu restricții.

In cele ce urmează vom face o sumară trecere în revistă și analiză a metodelor specifice apartinind celor două categorii enunțate.

1. Metode de programare neliniară fără restricții

1.1. Condițiile de existență a extremum-ului liber

Pentru început vom prezenta, succint, condițiile de existență a extremumului liber (fără restricții) al unei funcții de mai multe variabile, aşa cum sunt formulate în analiza matematică.

O funcție numerică de n variabile $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ este o lege care asociază fiecărui punct x dintr-o mulțime X (scriem $x \in X \subset \mathbb{R}^n$) un număr, notat $z = f(x_1, \dots, x_n)$ sau simplu $z = f(x)$. Geometric, reprezintă o hipersuprafață (în spațiul \mathbb{R}^{n+1}) ale cărei suprafețe de nivel au ecuații de forma $f(x) = c$.

Spunem că funcția are un minim absolut (global) pe X în $x^0 \in X$ dacă $f(x^0) \leq f(x)$ pentru orice $x \in X$. Spunem că $f(x)$ are un minim relativ (local) pe X în x^0 dacă $f(x^0) \leq f(x)$ pentru orice $x \in X$ apartinind unei vecinătăți a lui x^0 .

Vecinătatea punctului x^0 presupune mulțimea punctelor x pentru care distanța la x^0 , adică $\|x - x^0\| < \delta$ dat.

Inlocuind $f(x^0) \leq f(x)$ cu $f(x^0) \geq f(x)$ obținem definițiile pentru maxim absolut respectiv relativ.

Problema determinării optimului (maxim sau minim) constituie obiectul programării matematice.

Condițiile de existență a extremumului liber al funcției $F(x)$. [38]; [39].

1.1.1. Condiții necesare

Fie $F(X) = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ($F:D$) și punctul $x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0$ în interiorul domeniului D .

Spunem că $F(X)$ admite un maxim (minim) în punctul $(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$ dacă există o vecinătate,

$$(x_1^0 - \delta, x_1^0 + \delta; x_2^0 - \delta; x_2^0 + \delta \dots; x_n^0 - \delta, x_n^0 + \delta) \quad (91)$$

a punctului, astfel încât pentru toate punctele acestei vecinătăți, să se verifice inegalitatea:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq f(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) \quad (\leq) \text{ pt. maxim} \quad (92)$$

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq f(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) \quad \text{pt. minim}$$

Dacă avem inegalitate strictă (\neq) funcția admite în punctul $(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$ un maxim (minim) propriu sau global.

Presupunem că funcția admite un extremum în $(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$;

Dacă în acest punct există (și sunt finite) derivatele parțiale:

$$f'_{x_1}(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0), \dots, f'_{x_n}(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$$

toate acestea se anulează, adică anularea derivatelor parțiale de ord. I este o condiție necesară a existenței extremumului.

Cu alte cuvinte punctele care pot fi puncte de extremum se află printre punctele în care derivatele parțiale de ord. I se anulează. Le numim puncte staționare.

Coordonatele lor se pot găsi rezolvând sistemul de ecuații:

$$\begin{aligned} f'_{x_1}(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \\ f'_{x_2}(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \\ \dots \\ f'_{x_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \end{aligned} \quad (93)$$

1.1.2. Condiții de suficiență

Dezvoltînd diferență:

$$\Delta = f(x_1, x_2, \dots, x_n) - f(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) \quad (94)$$

după formula lui Taylor, obținem:

$$\begin{aligned} \Delta &= \frac{1}{2} \left[f_{x_1^2}'' \Delta x_1^2 + f_{x_2^2}'' \Delta x_2^2 + \dots + f_{x_n^2}'' \Delta x_n^2 + \right. \\ &\quad + 2f_{x_1 x_2}'' \Delta x_1 \Delta x_2 + 2f_{x_1 x_3}'' \Delta x_1 \Delta x_3 + \\ &\quad \left. +, \dots + 2f_{x_{n-1} x_n}'' \Delta x_{n-1} \Delta x_n \right] = \quad (95) \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{2} \sum_{i,k=1}^n f_{x_i x_k}'' \Delta x_i \Delta x_k$$

unde:

$$\Delta x_i = x_i - x_i^0$$

OBS: primul termen dispare $(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$ fiind punct stationar.

Toate derivatele parțiale sunt calculate într-un anumit punct:

$$(x_1^0 + \theta \Delta x_1, x_2^0 + \theta \Delta x_2, \dots, x_n^0 + \theta \Delta x_n)$$

$$(0 < \theta < 1)$$

astfel că; introducem notațiile:

$$" f_{x_i x_k}^0 (x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) = \partial_{ik} (i, k = 1, 2, \dots, n) \quad (96)$$

astfel că:

$$" f_{x_i x_k}^0 (x_1^0 + \theta \Delta_{x_1} + \dots + x_n^0 + \theta \Delta_{x_n}) = \partial_{ik} + \alpha_{ik} \quad (97)$$

și:

$$\alpha_{ik} \rightarrow 0 \text{ pt. } \Delta_{x_1} \rightarrow 0 \dots \Delta_{x_n} \rightarrow 0$$

OBS. Se înțelege că :

$$\partial_{ik} = \partial_{ki} \text{ și } \alpha_{ik} = \alpha_{ki}$$

Expresia Δ se poate scrie sub forma :

$$\Delta = \frac{1}{2} \left[\sum_{i,k=1}^n \partial_{ik} \Delta_{x_i} \Delta_{x_k} + \sum_{i,k=1}^n \alpha_{ik} \Delta_{xi} \Delta_{xk} \right] \quad (98)$$

Primul termen din paranteză este diferențiala de ordinul al II-lea a funcției f în punctul considerat; ea se exprimă printr-un polinom omogen de gradul II, sau cum se spune printr-o formă pătratică în variabilele $\Delta_{x_1}, \Delta_{x_2}, \dots, \Delta_{x_n}$

Condiția de suficiență

Dacă forma pătratică:

$$\sum_{i,k=1}^n \partial_{ik} \Delta_{xi} \Delta_{xk} \quad (99)$$

cu coeficientii dati de (96) este o formă pătratică definită pozitiv sau negativ, în punctul cercetat $(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$ funcția are minim (maxim) propriu sau global.

Condiția necesară și suficientă pentru ca o formă pătratică să fie pozitiv definită se exprimă prin inegalitățile lui Sylvester.

$$a_{11} > 0, \begin{vmatrix} a_{11} a_{12} \\ a_{21} a_{22} \end{vmatrix} > 0, \begin{vmatrix} a_{11} a_{12} a_{13} \\ a_{21} a_{22} a_{23} \end{vmatrix} > 0, \dots, \begin{vmatrix} a_{11} a_{12} \dots a_{1n} \\ a_{21} a_{22} \dots a_{2n} \\ \dots \\ a_{n1} a_{n2} \dots a_{nn} \end{vmatrix} > 0 \quad (100)$$

1.2. Metode numerice pentru găsirea minimului fără restricții

In continuare ne vom referi la minimizarea funcției obiectiv, întrucât din punct de vedere formal nu există o deosebire între minimizarea sau maximizarea funcției $F(x)$, deoarece minimul lui $F(X)$ are loc pentru maximul lui $-F(X)$.

Cu toate că această formulare a problemei de optimizare are puține aplicații practice directe, o serie de probleme de minimizare cu restricții pot fi rezolvate reducindu-le la probleme de minimizare neconstrânsă, aşa cum se va vedea în paragraful următor, pentru care s-au elaborat algoritmi de optimizare foarte eficienți.

Metodele de căutare a minimului unei funcții de n variabile fără restricții pot fi împărțite în două categorii:

1.2.1. metode fără evaluarea derivatei;

1.2.2. metode de gradient (cu evaluarea derivatei).

Din prima categorie fac parte metodele descrise mai jos.

1.2.1.1. Metode aleatoare de căutare (25);(56);(70).

Metodele aleatoare de căutare determină minimul global al unei funcții de n variabile și se bazează pe generarea unui

grup de numere aleatoare într-un domeniu prestabilit. Valorile variabilelor față de care funcția este definită sunt alese cu ajutorul numerelor aleatoare.

In acest scop, se generează la fiecare iterație a procesului de minimizare o succesiune de numere aleatoare având o densitate de probabilitate uniformă în domeniul de variație admis cu ajutorul cărora se atribuie valori pentru variabilele independente.

Se alege apoi punctul în care valoarea funcției este minimă. In continuare, se restrînge domeniul în jurul punctului de minim aflat și procesul se repetă pentru o nouă iterăție. Ultima valoare a funcției, obținută în momentul în care domeniul admis a devenit mai mic decât cel impus, constituie minimul global căutat.

Metodele aleatoare sunt rar folosite în practică datorită timpului de calcul mult superior altor metode. Ele pot fi utilizate în cazul problemelor care necesită minimizarea unor funcții de un număr redus de variabile. De asemenea, ele sunt utilizate pentru a calcula punctul de start în cazul aplicării unor metode mai eficiente.

1.2.1.2. Metoda căutării unidimensionale (25);(34);(56) denumită și metoda relaxării, determină minimul funcției $F(x) = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ modificînd pe rînd componentele vectorului X .

Să pornescă cu incrementarea primei componente, celelalte fiind menținute constante, atît timp cît funcția F descrescă. Se trece apoi la cea de a doua componentă, etc. În momentul în care s-au modificat toate componentele x_i se consideră încheiat, un ciclu. Se reia din nou cu prima componentă efectuînd un număr de cicluri complete, pînă cînd funcția F a ajuns la valoarea minimă, considerată cu o anumită toleranță.

O imagine a acțiunii acestei metode în cazul funcției test:

$$F(x_1, x_2) = 4 + 4,5 x_1 - 4 x_2^2 + x_1^4 + 2x_2^2 - 2x_1 x_2 + x_1^2 x_2^2 \quad (101)$$

se prezintă în figura următoare:

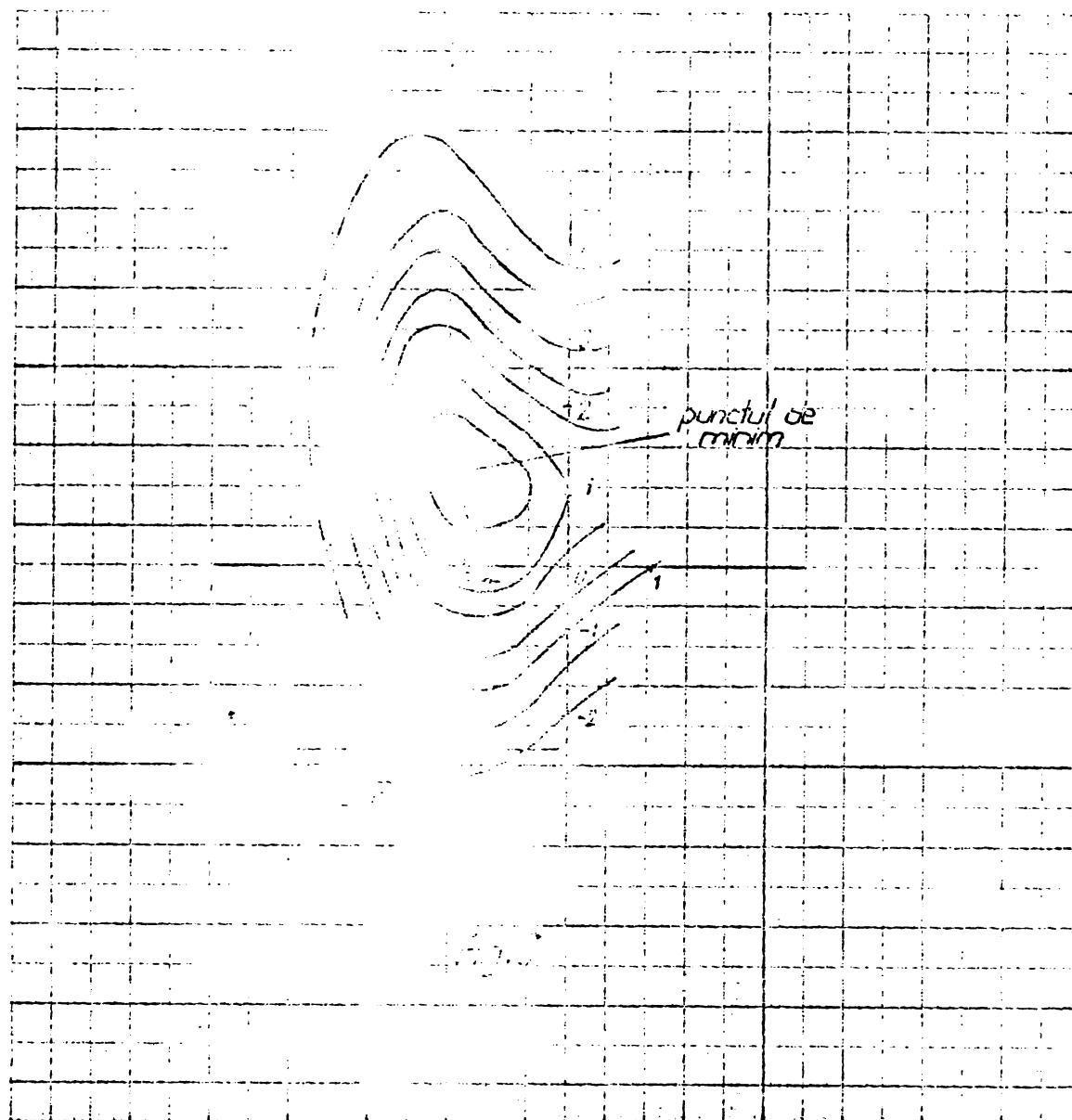


Fig. 6

Matematică în fizica interacție se determină un nou vector x_{k+1} după relația:

$$x_{k+1} = x_k + s_k \cdot p \quad (102)$$

în care s_k este un vector care se modifică ciclic, având o singură componentă egală cu unitatea, celelalte nule, adică $s_1 = (1, 0, 0, \dots, 0), s_2 = (0, 1, 0, \dots, 0), \dots, s_n = (0, 0, 0, \dots, 1)$, iar p o mișcare scăzută, numărindu-se la mijlocul ciclului, incit $F(x_{k+1}) < F(x_k)$. În continuare se urmărește să se mențină o scădere constantă pe metoda căutării extremităților, care se face într-o anumită direcție, în funcție de modul lui p .

În continuare, pasului p se menține micșorat de la un ciclu "r".

Un algoritm în care valoarea p este durată unui ciclu, rămâne report cu o razie subunitară.

(1). Se consideră un vector inițial X_0 . Se calculează valoarea corespunzătoare a funcției $F(X_0)$.

(2). Se modifică componenta x_1 , de la valoarea inițială x_{10} la valoarea x_{11} obținută prin incrementarea cu pasul "p". astfel ca:

$$x_{11} = x_{10} + p \quad (103)$$

Se calculează noua valoare a funcției $F(X_1)$.

Dacă:

$$F(X_1) < F(X_0) \quad (104)$$

se continuă incrementarea variabilei x_1 cu cantitatea p pentru a obține sirul $x_{12}, x_{13}, \dots, x_{1q}$ și se calculează valorile corespunzătoare $F(X_2), F(X_3), \dots, F(X_q)$.

Dacă în schimb, după prima incrementare:

$$F(X_1) > F(X_0) \quad (105)$$

se face modificarea variabilei x_1 în sens opus adică următoarea incrementare se ia egală cu $-2p$, iar în continuare se consideră pasul $-p$ în loc de p .

(3). Presupunând că există un minimum de-a lungul componentei x_1 , la un anumit moment se va constata că valoarea lui F crește.

Fie deci:

$$F(X_m) > F(X_{m-1}) \quad (106)$$

și

$$F(X_{m-1}) < F(X_{m-2}) \quad (107)$$

adică funcția are un minim pentru variația componentei x_1 între valorile $x_{1,m-2}$ și $x_{1,m}$. În urma acestei constatări se revine la valoarea $x_{1,m-1}$ pentru care a fost îndeplinită ultima dată condiția (107).

(4). Lăsând pe x_1 la valoarea $x_{1,m-1}$ se trece la incrementarea variabilei x_{20} urmând procedura descrisă între pașii 1 și 3. Se continuă cu x_{30} și succesiv pînă la ultima variabilă x_{n0} .

În momentul în care au fost îndeplinite condițiile (106) și (107) pentru cea de-a n-a variabilă se consideră un ciclu încheiat.

(5). Se modifică pasul p prin înmulțirea cu rația r , reluînd algoritmul conform pașilor 1 și 4. Înaintea fiecărui nou ciclu se compară pasul p cu valoarea de test ε .

În momentul în care este îndeplinită condiția

$$p < \varepsilon \quad (108)$$

s-a obținut minimul funcției F în limita de toleranță ε și algoritmul se încheie.

Alegerea punctului de start, a pasului inițial și a rației de incrementare au o deosebită importanță în rapiditatea algoritmului. În cazul funcțiilor foarte excentrice cum sunt funcțiile test ale lui Rosenbrock și Powell datorită și erorilor de rotunjire introduse de calculator minimul global nu poate fi întotdeauna atins.

Metoda este, în general, mai lentă decît metodele de gradient, ce vor fi descrise în § 2.2 dar prezintă avantajul că nu reclamă calculul derivatelor partiale ale funcției de optimizat.

Așa cum se va putea constata în continuare, majoritatea tehnicilor de optimizare determină minimul funcției $F(X)$ în spațiul cu n dimensiuni prin executarea unor minimizări unidimensionale de-a lungul unei mulțimi de direcții $\{S_i\}$. Astfel, eficiența procedurii depinde esențial de eficiența metodei utilizate pentru rezolvarea problemei de-a lungul unei direcții.

In metoda prezentată anterior minimizarea de-a lungul unei direcții se face în mod rudimentar, pornind de la un pas initial a cărui valoare în /zj/ majoritatea cazurilor este aleasă la întâmplare.

Pentru a obține rezultate superioare s-au căutat metode care accelerează acest proces de căutare a minimului.

Pentru o funcție de n variabile, esența căutării minimului de-a lungul unei direcții determină noul vector de poziție.

$$x_{k+1} = x_k + \alpha s_k \quad (109)$$

astfel ca $F(x)$ de-a lungul direcției s_k să fie minim. Deoarece pentru o anumită direcție, x_k și s_k sunt constante, rezultă:

$$F(x_k + \alpha s_k) = f(\alpha) \quad (110)$$

Adică pentru direcția dată se va căuta valoarea lui α care minimizează pe $f(\alpha)$ și prin aceasta problema minimizării unei funcții de n variabile și reduce la o succesiune de minimizări ale funcției $F(x)$ în raport cu o singură variabilă.

Vor fi prezentate trei tehnici având ca factor comun faptul că nu necesită evaluarea derivatelor. Spre deosebire de primele două, cea de-a treia metodă nu depinde de proprietatea funcției de minimizat, de a fi netedă, putând fi aplicată chiar funcțiilor discontinue.

1.2.1.2.1. Interpolarea pătratică (25) (56)

O primă idee în determinarea minimului funcției $f(\alpha)$ constă în înlocuirea acesteia cu un polinom de gradul al doilea $Q(\alpha)$, reprezentând o parabolă, al cărui minim poate fi ușor determinat. Dacă α_0, α_1 și α_2 sunt trei puncte ale funcției între care se află minimul căutat, putem exprima pe $Q(\alpha)$ prin relația:

$$Q(\alpha) = c_0 + c_1 (\alpha - \alpha_0) + c_2 (\alpha - \alpha_0)(\alpha - \alpha_1) \quad (111)$$

Minimul acestui polinom se obține în punctul α^* pentru care derivata se anulează:

$$\frac{dQ}{d\alpha} = c_1 + c_2 (2\alpha^* - \alpha_0 - \alpha_1) = 0 \quad (112)$$

sau:

$$2\alpha^* = \alpha_0 + \alpha_1 - \frac{c_1}{c_2} \quad (113)$$

Inlocuind, succesiv, în (111) pe α cu α_0 , apoi cu α_1 și final cu α_2 , obținem sistemul de ecuații:

$$Q_0 = Q(\alpha_0) = c_0$$

$$Q_1 = Q(\alpha_1) = c_0 + c_1(\alpha_1 - \alpha_0); \quad (114)$$

$$Q_2 = Q(\alpha_2) = c_0 + c_1(\alpha_1 - \alpha_0) +$$

$$+ c_2 (\alpha_2 - \alpha_0) (\alpha_2 - \alpha_1)$$

a cărui rezolvare conduce la soluțiile:

$$c_0 = Q_0$$

$$c_1 = \frac{Q_1 - Q_0}{\alpha_1 - \alpha_0}$$

$$c_2 = \frac{Q_2 - Q_0 - \frac{\alpha_2 - \alpha_0}{\alpha_1 - \alpha_0} (Q_1 - Q_0)}{(\alpha_2 - \alpha_0) (\alpha_2 - \alpha_1)} \quad (115)$$



Pentru ca α^* să corespundă unui minim mai trebuie să satisfacă și condiția:

→ Inlocuind în (111) pe c_1 și c_2 , rezulta final:

$$d^* = \frac{1}{2} \frac{(\alpha_1^2 - \alpha_2^2) Q_0 + (\alpha_2^2 - \alpha_0^2) Q_1 + (\alpha_0^2 - \alpha_1^2) Q_2}{(\alpha_1 - \alpha_2) Q_0 + (\alpha_2 - \alpha_0) Q_1 + (\alpha_0 - \alpha_1) Q_2} \quad (116)$$

$$\frac{d^2 Q}{d\alpha^2} \Big|_{\alpha=\alpha^*} > 0 \quad (117)$$

ceea ce conduce la:

$$Q_2 + Q_0 < 2 Q_1 \quad (118)$$

Punctul a cărui abscisă este α^* reprezintă minimul formei pătratice $Q(\alpha)$ de-a lungul direcției α . Acest minim va exprima mai mult sau mai puțin bine minimul lui $f(\alpha)$, în măsură în care $f(\alpha)$ poate fi aproximat cu un polinom de gradul doi în intervalul considerat. Dacă această aproximare este mai puțin bună, fapt constatat în urma verificării unor condiții de test, procesul de interpolare este reluat pe intervalul $\alpha_0, \alpha_1, \alpha^*$ sau $\alpha_1, \alpha^*, \alpha_2$, după poziția lui α^* făță de α_1 .

În continuare, urmează o nouă etapă de interpolare pînă se atinge precizia impusă.

Practic, pentru rularea procedurii sunt necesare următoarele date:

- un punct inițial x_i ;
- vectorul direcției s_i ;
- o margine superioară m a lungimii pasului de-a lungul direcției de minimizare;
- toleranța ε cu care minimul urmează a fi determinat.

Algoritmul are următorii doi pași::

(1). Se determină $F(x_i)$ și apoi $F(x_i + p s_i)$ unde p este valoarea pasului, mai mică decît marginea superioară m . Dacă $F(x_i + p s_i) < F(x_i)$ se determină $F(x_i + 2 p s_i)$ și se rețin pentru interpolare punctele x_i , $x_i + p s_i$ și $x_i + 2 p s_i$.

Dacă în schimb , $F(x_i + p s_i) > F(x_i)$ se determină $F(x_i - p s_i)$ și se rețin pentru interpolare punctele $x_i - p s_i$, x_i și $x_i + p s_i$.

(2). Notînd cele trei puncte de interpolare prin α_0 , α_1 , α_2 se reîn cele trei valori ale funcției calculate în aceste puncte, valori (variabile) notate prin Q_0 , Q_1 , Q_2 , determinăm apoi abscise punctului de minim α^* al polinomului de interpolare de ordinul doi care trece prin cele trei puncte Q_0 , Q_1 , Q_2 cu ajutorul relației (116).

Dacă punctul de extrem este un maxim sau dacă valoarea determinată pentru α^* conduce la un pas mai mare decît cel descris prin valoarea m , procedeul de interpolare se repetă după ce punctul cel mai îndepărtat $x_i + \alpha^* s_i$ a fost eliminat.

Dacă în schimb $\alpha^* < m$, valoarea sa se compară cu α_0 , α_1 și α_2 pentru a verifica convergența. În ipoteza în care sunt îndeplinite condițiile $|\alpha_0 - \alpha^*| < \varepsilon$; $|\alpha_1 - \alpha^*| < \varepsilon$, și $|\alpha_2 - \alpha^*| < \varepsilon$ punctul α^* este considerat ca indicînd minimul funcției pe direcția s_i . Cînd cel puțin una din condițiile de convergență nu e satisfăcută, procesul de interpolare se repetă cu trei din cele patru puncte, eliminînd punctul în care funcția a avut cea mai mare valoare. Această eliminare nu este aplicată în mod mecanic, ci se preferă a se reține trei puncte, notate acum prin a, b, c , din cele patru disponibile, $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha^*$, între care să existe cel cu cea mai mică valoare, adică să fie îndeplinită condiția:

$$F(x_i + aS_i) > F(x_i + bS_i) < F(x_i + cS_i)$$

In unele situații interpolarea printr-o formă, pătratică a funcției de minimizat nu este suficient de precisă. În consecință s-au propus polinoamele de interpolare de ordin superior, dintre care polinomul de gradul trei este cel mai mult utilizat în algoritmii care apelează la gradient (Fletcher - Reeves și Davidon - Fletcher - Powell).

Pentru a înlătura deficiențele de convergență în căutarea minimului de-a lungul unei direcții, date de interpolarea repetată au fost propuse o serie de algoritmi adhoc.

In cele ce urmează se prezintă algoritmul lui Brent care combină interpolarea repetată cu căutarea așa numitei "secțiuni de aur" și tehnica Fibonacci.

1.2.1.2.2. Algoritmul lui Brent (19) caută minimul unei funcții f de o variabilă în intervalul (a, b) . La un anumit pas există șase puncte semnificative a, b, u, v, w și x , nu în mod necesar distințe. Pozițiile acestora se schimbă pe parcursul dezvoltării algoritmului. Inițial a și b definesc intervalul în care se află minimul căutat iar:

$$v = w = x = a + \frac{3 - \sqrt{5}}{2} (b - a) \quad (119)$$

unde numărul „magic”

$$(3 - \sqrt{5})/2 = 0,381966\dots \text{ este ales arbitrar.}$$

Minimul local este mărginit de intervalul (a, b) , x reprezintă ultimul punct în care funcția a fost evaluată, w este punctul cu cea mai mică valoare a lui f , determinat în ciclul precedent, v reprezintă poziția anterioară a lui w , iar u este punctul ce urmează a fi calculat.

Se consideră:

$$c = \frac{1}{2} (a + b) \quad (120)$$

punctul medial al intervalului care conține minimul. Dacă:

$$|x - c| \leq 2 \xi - \frac{1}{2} (b - a) \quad (121)$$

deci:

$$\max(x - a, b - x) \leq 2 \xi \quad (122)$$

algoritmul se încheie, definindu-l pe x , ca punct de minim.

In relațiile anterioare ξ reprezintă eroarea cu care funcția f este calculată.

Dacă minimul nu a fost aflat, se calculează mărimile p și q ($q \gg 0$) cu ajutorul relațiilor:

$$p = \pm \left[(x-v)^2 (f(x) - f(w)) - (x-w)^2 (f(x) - f(v)) \right] \quad (123)$$

$$q = \mp 2 \left[(x-v) (f(x) - f(w)) - (x-w) (f(x) - f(v)) \right]$$

și astfel noul punct u este definit de:

$$u = x + \frac{p}{q} \quad (124)$$

va reprezenta minimul parabolei care trece prin $(v, f(v))$, $(w, f(w))$ și $(x, f(x))$.

Dacă e reprezentă valoarea raportului p/q din iterată anterioară, iar pentru iterată în curs este îndeplinită una din condițiile:

$$\frac{p}{q} \notin [a \cdot b] \quad (125)$$

respectiv:

$$\left| \frac{p}{q} \right| > \frac{1}{2} |e|$$

noua valoare a lui u se ia egală cu:

$$u = \begin{cases} \frac{(3-\sqrt{5})}{2} (a-x), & \text{dacă } x \geq c \\ \frac{(3+\sqrt{5})}{2} (b-x), & \text{dacă } x < c \end{cases} \quad (127)$$

adică folosind „secțiunea de aur”.

1.2.1.2.3. Tehnica Fibonacci. Nu folosește derivate. Se poate aplica unor funcții care nu sunt diferențiabile sau chiar nici continue, funcții la care tehniciile anterioare nu sunt aplicabile.

Metoda execută minimizarea în ipoteza că valoarea optimă a variabilei se găsește în interiorul unui anumit interval de incertitudine. În continuare, prin evaluări ale funcției în interiorul intervalului, acesta se reduce în mod sistematic, obținându-se astfel o încadrare a punctului optimal.

Pentru a efectua aceasta fără gradienti este necesar să se facă anumite ipoteze asupra funcției de minimizat. Metoda Fibonacci porneste de la ipoteza că funcția este unimodală în interiorul intervalului initial de incertitudine.

Unimodalitate

Pe scurt, prin funcție unimodală se înțelege o funcție care are numai un singur extrem (maxim sau minim).

Din punct de vedere matematic aceasta se formulează astfel:

Fie x^* punctul de minim și fie prin definiție $x_1 > x_2$. Atunci funcția $f(x)$ este unimodală, dacă:

$$x_2 < x^* \text{ implică } f(x_2) < f(x_1) \quad (127)$$

și:

$$x_1 > x^* \text{ implică } f(x_1) > f(x^*)$$

Aceasta ne permite să reducem orice interval initial de incertitudine numai prin evaluări ale funcției. Să considerăm intervalul normalizat $(0,1)$ și două evaluări ale funcției (de acum înainte numite „experiente”) situate în interiorul lui, cum sunt reprezentate în fig. 7.

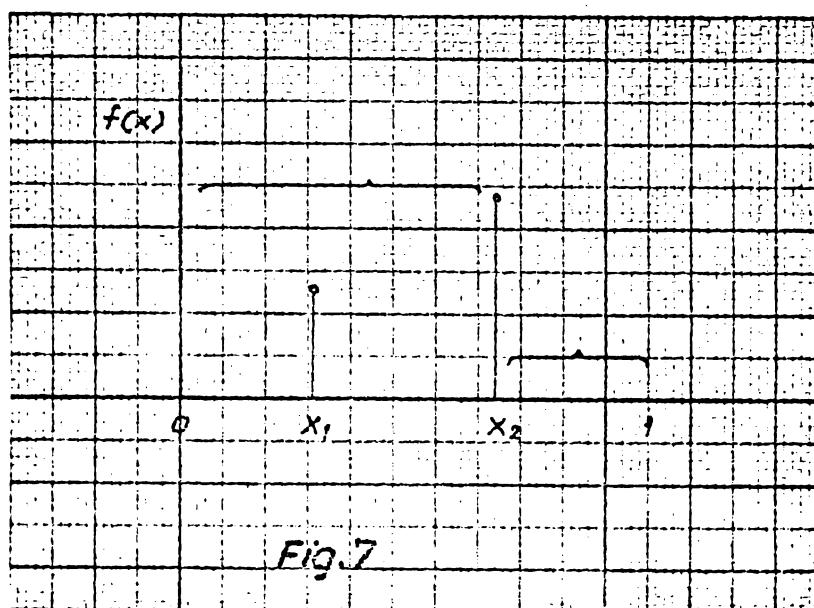


Fig. 7

Dacă funcția este unimodală adică are un singur minim, atunci minimul nu se poate găsi la dreapta lui x_2 .

Această parte a intervalului poate fi eliminată și rezultă un interval de incertitudine redus. Dacă am fi avut $f(x_1) > f(x_2)$ atunci s-ar fi diminuat intervalul $(0, x_1)$, iar dacă am fi avut $f(x_1) = f(x_2)$, atunci ambele intervale ar fi putut fi eliminate.

De altfel, dacă unul dintre experimentele inițiale rămîne în interiorul acestui nou interval, în scopul repetării procesului, este necesar ca numai unul dintre celelalte experimente să fie plasat în interiorul lui.

Metoda Fibonacci plasează experimentele în așa fel încît întotdeauna unul din experimentele inițiale să rămînă. Metoda utilizează sirul numerelor Fibonacci, $\{F_n\}$, definit de

$$F_0 = F_1 = 1$$

$$F_n = F_{n-1} + F_{n-2}, \quad n = 2, 3, \dots, \text{adică} \quad (128)$$

sirul:

$$1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, \dots$$

Să presupunem că avem de făcut un număr de n experimente. Se procedează în felul următor:

Fie L_0 intervalul inițial de incertitudine.

Se definește:

$$L_2^* = \frac{F_{n-1}}{F_n} L_0, \quad (129)$$

unde n este numărul de experimente pe care le avem de făcut. Se plasează experimentul inițial la L_2 unități de un capăt al intervalului, iar al doilea experiment la L_2 unități de celălalt capăt.

Pe baza ipotezei de unimodalitate se elimină o parte a intervalului. Rămîne un interval mai scurt, avînd în interior unul din experimente situat la o anumită distanță de unul (indiferent care) dintre capete. Se plasează un nou experiment la

aceeași distanță de celălalt capăt și se repetă procedura. Metoda se oprește după efectuarea unui număr de n experimente.

Exemplu

Funcția care trebuie minimizată este reprezentată în fig. 8. Se presupune că numărul n al experimentelor este egal cu 5. În cazul acesta:

$$L_2 = \frac{F_4}{F_5} \quad L_0 = \frac{5}{8} L_0 \quad (130)$$

Se plasează experimentul initial la $5/8 L_0$ de unul din capete (capătul din stînga), iar al doilea la $5/8 L_0$ de celălalt capăt. Se elimină $[x_1, L_0]$. Experimentul x_2 se află la distanță $3/8 L_0$ de $x=0$. Se plasează x_3 la distanță $3/8 L_0$ de $x=x_1$ și se elimină $[0, x_3]$. Experimentul x_2 (rămas în interiorul intervalului redus) se află la distanță $1/8 L_0$ de capătul x_3 , plasăm experimentul x_4 la aceeași distanță $1/8 L_0$ de celălalt capăt (x_1); eliminăm intervalul $[x_4, x_1]$; x_2 a rămas la mijlocul intervalului $[x_3, x_4]$ și următorul experiment x_5 s-ar suprapune peste x_2 deoarece acesta nu ar furniza nici o informație nouă, se efectuează o mică deplasare a ultimului experiment, obținind intervalul final de incertitudine $[x_2, x_4]$.

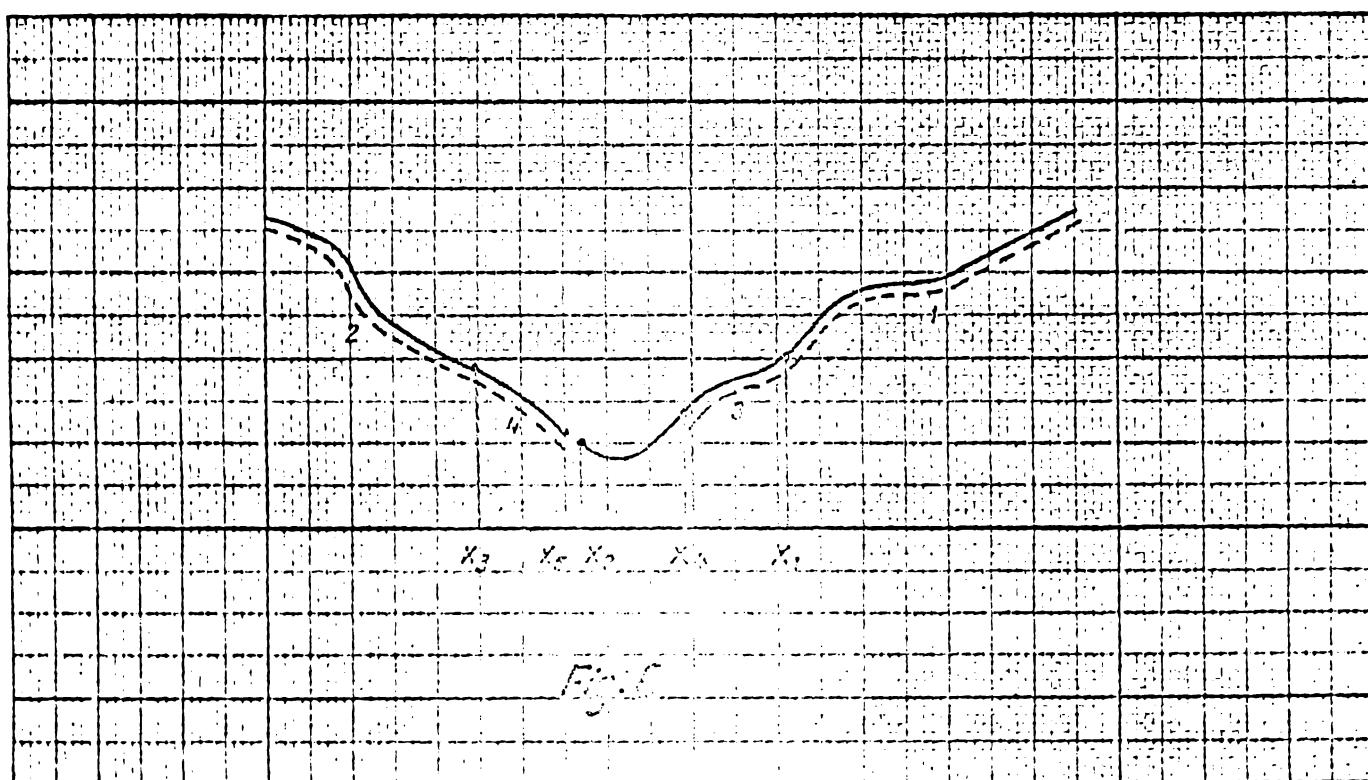


Fig.8. Minimizarea prin metoda Fibonacci

- - -

Se observă că după eliminarea primului interval $x_1 \in L_0$, experimentul rămas se găsește la o distanță $\frac{2}{5} L_3^* = \frac{F_3}{F_4} L_3^*$ de zero, unde L_3^* este lungimea intervalului de incertitudine rămas. Aceasta este exact poziția primului experiment dintr-o procedură Fibonacci de patru experimente ce folosește ca interval initial de incertitudine pe L_3 .

Astfel orice secțiune a unei proceduri F poate fi considerată ca începutul unei noi proceduri F cu un număr mai mic de experimente de făcut și cu un interval initial de incertitudine mai mic.

Având la bază, în general, tehniciile descrise anterior s-au elaborat o serie de algoritmi, fără evaluarea derivatei pentru minimizarea funcțiilor neliniare de n variabile, fără restricții, dintre care vom aminti:

1.2.1.3. Algoritmul de optimizare ciclică pe axe de coordonate (CYCO).

1.2.1.4. Algoritmul de optimizare ciclică pe axe de coordonate și diagonală (CYCOD).

1.2.1.5. Algoritmul lui Hooke și Jeeves (LOOK).

1.2.1.6. Algoritmul lui Rosenbrock.

1.2.1.7. Algoritmul lui Davies - Swann - Campey (D.S.C)

1.2.1.8. Algoritmul lui Powell.

Din considerante de economie a lucrării nu vom descrie decât algoritmul 1.2.1.8. considerat de majoritatea autorilor ca fiind cel mai eficient, în minimizarea funcției de n variabile fără restricții, din categoria algoritmilor care nu necesită evaluarea derivatei.

1.2.1.8. Algoritmul lui Powell (86);(25);(32);(56);(70)

Dăsi nu apelează la gradient, care presupune derivarea numerică a funcției $F(X)$, și cu atât mai puțin la matricea hessiană (matricea derivatelor parțiale de ordinul II) algoritmul lui Powell, pentru funcții pătratice, atinge minimul în exact n cicluri la fel ca cei mai eficienți algoritmi cu eva-

Chiar pentru funcții nepătratice, la apropierea de minim algoritmul are viteza convergenței pătratice. Aceasta înseamnă că pentru funcții pătratice direcțiile de căutare sunt mutual conjugate iar pentru funcții nepătratice aceste direcții sunt conjugate în raport cu matricea care aproximează matricea hessiană a funcției $F(X)$.

Fiindcă la determinarea direcției căutării se ia în considerare curbura locală a funcției este de așteptat ca și în punctele îndepărțate de minim convergența să fie mulțumitoare (70).

Metoda se bazează pe următorul principiu: orice dreaptă care trece prin punctul de minim al formei pătratice:

$$f(X) = \alpha + a^T X + X^T Q X / 2 \quad (131)$$

intersectează sub unghiuri egale suprafeteelor de nivel al acestei forme pătratice.

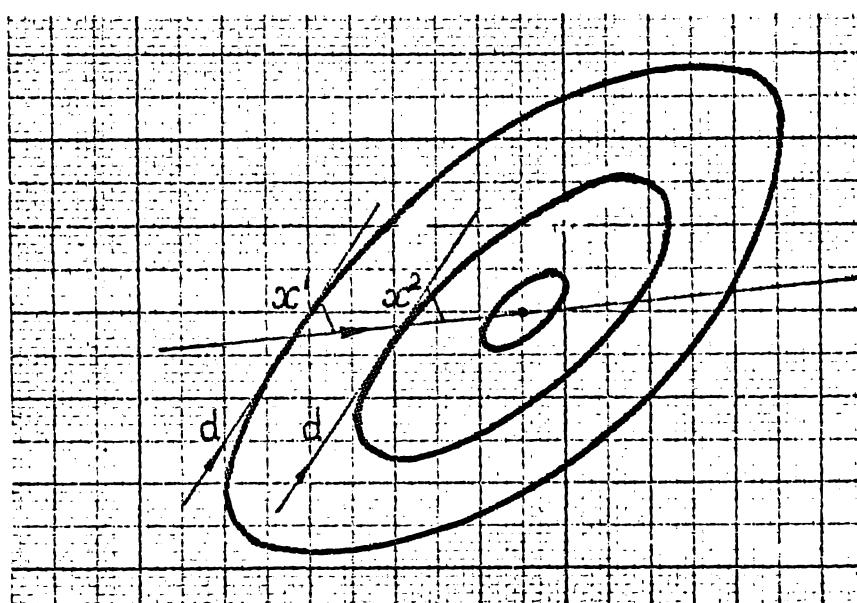


Fig.9. Principiul metodei lui Powell
(ilustrat pe un caz bidimensional)

Din aceasta reiese că dacă două minime, locale x^1 și x^2 se află pe două direcții paralele d - atunci minimul formei pătratice să fie căutat pe direcția $x^1 - x^2$. Această direcție este Q conjugată cu d , deoarece:

$$d^T r^i = 0 \quad i = 1, 2 \quad (132)$$

unde:

$$r^i = \nabla f(x^i) = a + QX^i \quad (133)$$

De aceasta ne putem convinge ușor prin calcule care conduc la:

$$0 = d^T (r^1 - r^2) = d^T Q (x^1 - x^2) \quad (134)$$

ceea ce confirmă faptul că vectorii d și $x^1 - x^2$ sunt Q conjugați.

Directiile căutării se determină prin următoarea procedură. Marcăm punctul initial prin vectorul de poziție X^0 .

(I). La început în calitate de d^i ($i = 1, 2, \dots, n$) se aleg n vectori unitari liniari independenti, de regulă direcțiile celor n coordonate, adică $d^i = e^i$, unde $e^i(0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0)^T$.

(II). Pentru directiile d^i , cunoscute, se calculează α_1^* astfel ca să minimizeze pe $F(X^{i-1} + \alpha_i d^i)$ de-a lungul direcției d^i (minimizarea se face conform procedurii de la § 1.2.1.2). Se determină $X^i = X^{i-1} + \alpha_i d^i$; $i = 1, \dots, n$.

(III) Se ia o nouă direcție $d = X^n - X^0$ și se înlocuiesc directiile d^1, \dots, d^n cu d^2, \dots, d^n, d , dind acestui nou set de directii denumirea d^1, \dots, d^n (cu alte cuvinte se face înlocuirea pentru $i=1, \dots, n-1$, a lui d^i cu d^{i+1} și se înlocuiește vechea direcție d^n cu $X^n - X^0$ iar d^1 se abandonează).

(IV) Se determină α^* care minimizează pe $F(X^n + \alpha d^n)$ și i se atribuie lui X^0 valoarea:

$$X^0 = X^0 + \alpha^* d^n \quad (135)$$

Luăm acest punct în calitate de X^0 pentru iterată următoare. Se trece la (II).

După n iterări toate cele n directii coordonate se înlocuiesc cu noile directii Q - conjugate reciproc ceea ce conferă algoritmului posibilitatea ca pentru funcții pătratice în exact n cicluri să atingă minimul.

1.2.2. Metode cu evaluarea derivatei (43);(25);(34);(56); (61);(69);(70);(83);(90);(109)

In acest subcapitol se evidențiază metodele de minimizare fără restricții, în care optimul se aproximează succesiv prin mișcări pe direcția gradientului sau direcții legate într-un anumit fel de direcția gradientului.

In bibliografia consultată se indică, în principal, următoarele metode:

1.2.2.1. - Metoda gradientului simplu.

1.2.2.2. - Metoda gradientului optimal al lui Cauchy
(metoda celei mai rapide descresteri)

1.2.2.3. - Metoda gradientului subrelaxat

1.2.2.4. - Metoda mixtă gradient - diagonală

1.2.2.5. - Metoda gradientului de ordinul doi, unde se încadrează cunoscutul algoritm Newton - Raphson care utilizează matricea hessiană.

1.2.2.6. - Metoda direcțiilor conjugate; în clasa direcțiilor conjugate se încadrează doi importanți algoritmi

1.2.2.7. - Algoritmul lui Fletcher - Reeves

1.2.2.8. - Algoritmul lui Davidson - Fletcher - Powell
(D.F.P.).

Metodele indicate la punctele 1.2.2.1. - 1.2.2.4. avin la bază gradientul de ordinul întîi, sănătatea numai în cazurile în care curbele de nivel ale funcției sunt hipersfere. Dacă aceste curbe au o oarecare excentricitate, datorită deplasărilor successive perpendiculare, se ajunge la o mișcare ciclică în zig-zag fără a se putea atinge minimul.

Metoda Newton - Raphson are proprietăți remarcabile de convergență în apropierea punctului de optim.

Dezavantajul metodei constă în necesitatea calculării la fiecare iterație a inversei matricei hessiene (H^{-1}) și în plus, dacă punctul de start x_0 este departe de optim, procesul poate chiar să nu fie convergent.

Din clasa direcțiilor conjugate vom prezenta doar algoritmul Davidon - Fletcher - Powell din aceleasi considerente a limitării întinderii lucrării, cu toate că și algoritmul gradientelor conjugate a lui Fletcher - Reeves este deosebit de interesant și eficient.

1.2.2.8. Metoda Davidon - Fletcher - Powell (cu metrică variabilă)

O metodă de gradient rezolvă problema minimului unei funcții pentru cazul general, numai dacă reușește să rețină într-un anumit fel informații asupra derivatelor parțiale de ordinul doi ale funcției de minimizat.

Pornind de la aceste considerente Davidon are ideea de a aproxima matricea hessiană, mai exact inversa ei J^{-1} , cu ajutorul diferenței gradientelor între punctele succesive obținute anterior.

Fletcher și Powell aduc contribuții și exemplifică eficacitatea metodei. În prezent algoritmul D.F.P. este considerat una din cele mai puternice proceduri generale pentru găsirea unui minim local, al unei funcții generale $f(X)$.

Se bazează pe generarea de direcții conjugate. Este astfel conceput, încât aplicat unei funcții pătratice de n variabile, să se realizeze minimizarea ei în n iteratii.

Pentru a explica strategia utilizată în metoda D.F.P. se consideră funcția pătratică:

$$F(X) = c + X^T B + \frac{1}{2} X^T J X \quad (136)$$

unde J este matricea derivatelor parțiale de ordinul al doilea (matricea hessiană).

Dacă matricea J este cunoscută, deplasarea dintr-un punct oarecare definit de vectorul X și punctul de minim caracterizat de vectorul X_m este dată de

$$X_m - X = - J^{-1} \nabla F(X) = - J^{-1} \cdot G \quad (137)$$

În metoda DFP matricea J^{-1} nu este calculată direct, ci în locul ei se utilizează o succesiune de matrice H_i , denumite matrice de deflexie. Inițial, pentru prima iterație $H_0 = I$

(matricea unitate) sau orice matrice simetrică pozitiv definită care estimează cel mai bine pe J^{-1} . Matricea H_i este actualizată la fiecare iterație și ea furnizează direcția, curentă de deplasare S_i , prin înmulțirea la dreapta, cu vectorul gradient curent,

$$S_i = -H_i G_i \quad (138)$$

direcție stabilită astfel ca funcția să ajungă la un minim pe direcția specificată.

Prin urmare, considerând X_0 punct de start și H_0 matricea inițială, deplasarea se face în direcția:

$$X_1 - X_0 = \Delta X_1 = -\alpha_1 H_0 G_0 \quad (139)$$

în care parametrul α , este astfel ales, încât să minimizeze funcția de-a lungul acestei direcții.

Rezultă că metoda D.F.P., generează o secvență de puncte, un sir Cauchy, X_1, X_2, \dots, X_k , astfel alese încât grad $F(X_k)$ în fiecare punct X_k este \perp pe direcția pașilor efectuați anterior, adică:

$$\begin{aligned} \nabla F(X_k)^T \nabla X_i &= 0 \quad (i=1,2,\dots,k; \\ k &= 1,2,\dots,n) \end{aligned} \quad (140)$$

Cel de al n -lea gradient trebuie să fie ortogonal cu n vectori ΔX , care au fost construși a fi liniar independenți. În aceste condiții $\nabla F(X_n)$ tinde spre zero, indicând X_{n+1} drept vector de poziție a punctului de minim X_m . Generarea matricelor H_1, H_2, \dots, H_n este făcută astfel, ca la interația $n+1$ să obținem:

$$H_{n+1} = J_m^{-1} \quad (141)$$

ceea ce evidențiază faptul că în metoda D.F.P. se elimină calculul matricei hessiene, precum și calculul inversei acesteia.

Metoda D.F.P. este valabilă și pentru funcții a căror formă nu este pătratică, întrucât în jurul punctului de minim o funcție neliniară poate fi aproximată foarte bine cu o formă pătratică. În baza celor menționate mai sus, algoritmul D.F.P. urmează succesiunea:

(1). Se alege un punct de start x_0 și o matrice simetrică pozitiv definită H_0 (de ex. I) și se stabilește direcția inițială

$$S_0 = -H_0 G_0 \quad (142)$$

(2). Noul punct x_{i+1} , se determină ca minim al funcției în direcția definită de S_i :

$$x_{i+1}^* = x_i + \alpha_i S_i \quad (143)$$

unde:

α_i^* minimizează pe $F(x_i + \alpha_i S_i)$.

Se calculează:

$$H_{i+1} = H_i + A_i + B_i \quad (144)$$

unde matricele A_i și B_i sunt definite de:

$$A_i = \frac{\Delta x_i \cdot \Delta x_i^T}{\Delta x_i \cdot y_i} \quad (145)$$

$$B_i = \frac{H_i y_i y_i^T H_i}{y_i^T H_i y_i} \quad (146)$$

în care:

$$\Delta x_i = x_{i+1} - x_i = \alpha_i s_i$$

*

(147)

$$y_i = \nabla F(x_{i+1}) - \nabla F(x_i)$$

(4). Se calculează:

$$s_{i+1} = - H_{i+1} \nabla F(x_{i+1}) \quad (148)$$

Ca test de terminare a producerii avem $|g_{i+1}| \leq \varepsilon$

Dacă testul de stop nu e îndeplinit se revine la pasul 2.

Observații: În relația (144) rolul matricei A_i constă în generarea matricei J_m^{-1} în n pași și pentru aceasta se alege:

$$\sum_{i=1}^n A_i = J_m^{-1} \quad (149)$$

În același timp secvența matricelor B_i are drept scop anularea valorii initiale introdusă prin H_0 și prin urmare:

$$\sum_{i=1}^n B_i = - H_0 \quad (150)$$

Răționând astfel, vom avea succesiv:

$$H_{n+1} = H_n + A_n + B_n = H_{n-1} + (A_n + A_{n-1}) + (B_n + B_{n-1}) \dots \quad (151)$$

$$= H_0 + \sum_{i=1}^n A_i + \sum_{i=1}^n B_i = J_m^{-1}$$

Se demonstrează (4) că dacă H_i este o matrice pozitiv definită, H_{i+1} va fi și ea o matrice pozitiv definită în ipoteza îndeplinirii condiției:

$$S_i^T \nabla F(X_{i+1}) = 0 \quad (152)$$

*

adică această condiție depinde numai de precizia cu care α_i este determinat pentru aflarea minimului de-a lungul direcției S_i .

In consecință la fiecare iterație trebuie să se verifice dacă este îndeplinită condiția (152), respectiv matricele H_i sunt pozitiv definite. In caz că o matrice H_i nu este pozitiv definită se înlocuiește cu $H=I$ și procesul continuă ca și cum l-am reinitializat de la un nou punct de start.

Calculul minimului de-a lungul unei direcții S_i , etapă esențială, a fost prezentat în paragrafele anterioare.

2. Metode de programare neliniară cu restricții.

In majoritatea cazurilor întâlnite în practică problemele de optimizare conțin restricții privind domeniul admis pentru vectorul soluției X .

Așa cum s-a mai spus, o problemă generală de programare neliniară se poate enunța astfel:

$$\min(\max) F(X) = F(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (153)$$

în prezența restricțiilor:

$$g_j(X) \quad \left\{ \begin{array}{l} \geq ; = ; \leq \\ \end{array} \right\} 0 \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (154)$$

unde:

$$F, g_j : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$$

- 27 -
 R^n - mulțimea punctelor spațiului euclidian cu n dimensiuni;

R - mulțimea numerelor reale.

Rezolvarea algoritmică completă a problemei generale de optimizare cu restricții, formulată prin (153); (154) nu este pînă în prezent posibilă.

2.1. Extremumuri legate (25);(32);(38);(39);(56);(61); (64);(109)

Prin generalizarea metodei clasice a multiplicatorilor lui Lagrange care definesc în analiza matematică condițiile necesare pentru existența extremumului cu legături, Kuhn și Tucker au stabilit pentru prima oară în 1950 condițiile care trebuiau să le îndeplinească un optim cu restricții, egalități sau inegalități, local sau global, condiții care stau la baza majorității algoritmilor utilizati în programarea neliniară.

2.1.1. Conuri

Ideea de con facilitează înțelegerea condițiilor K-T. Un con este o mulțime de puncte R , astfel încît, dacă x este în R , atunci λx este de asemenea în R pentru toți $\lambda \geq 0$. Un con convex este un con care este o mulțime convexă.

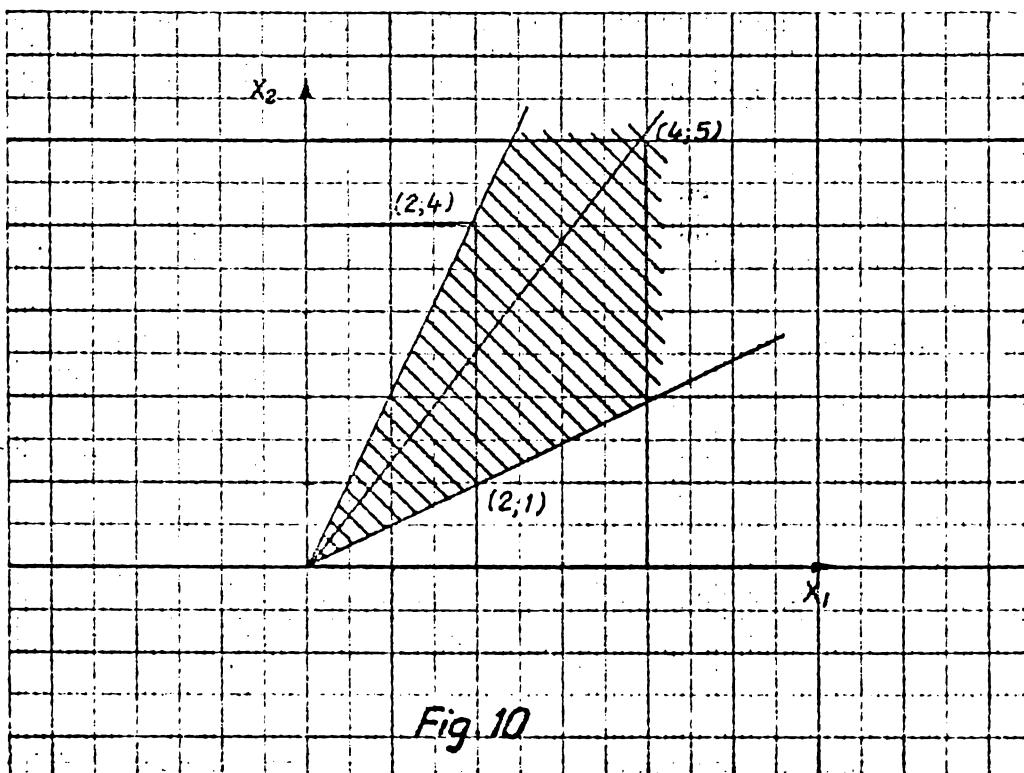


Fig.10 Con convex

In figura 10 este reprezentat un con în două dimensiuni. Din definițiile anterioare se vede că multimea tuturor combinațiilor liniare negative ale unei multimi finite de vectori, este un con convex, adică multimea:

$$R = \left\{ x \mid x = \lambda_1 x_1 + \lambda_2 x_2 + \dots + \lambda_m x_m, \lambda_i \geq 0 \right.$$

$i = 1, 2, \dots, m \}$ este un con convex

Vectorii x_1, x_2, \dots, x_m se numesc generatorii conului.

De exemplu, conul din fig. 10 este generat de vectorii (2,1 și 2,4).

Astfel orice vector care se poate exprima ca o combinație liniară pozitivă a unor alți vectori se găsește în conul generat de acești vectori. De exemplu, în fig. 10 vectorul (4,5) din con este dat de relația:

$$(4,5) = 1(2,1) + 1(2,4)$$

2.1.2. Condițiile Kuhn-Tucker. Interpretarea geometrică

Condițiile Kuhn-Tucker au la bază următorul fapt: pentru orice optim cu restricții nu există nici o variație (oricără mică) admisibilă a variabilelor care să îmbunătățească funcția obiectiv; pentru a ilustra acest lucru, să considerăm problema de programare neliniară.

Să se minimizeze:

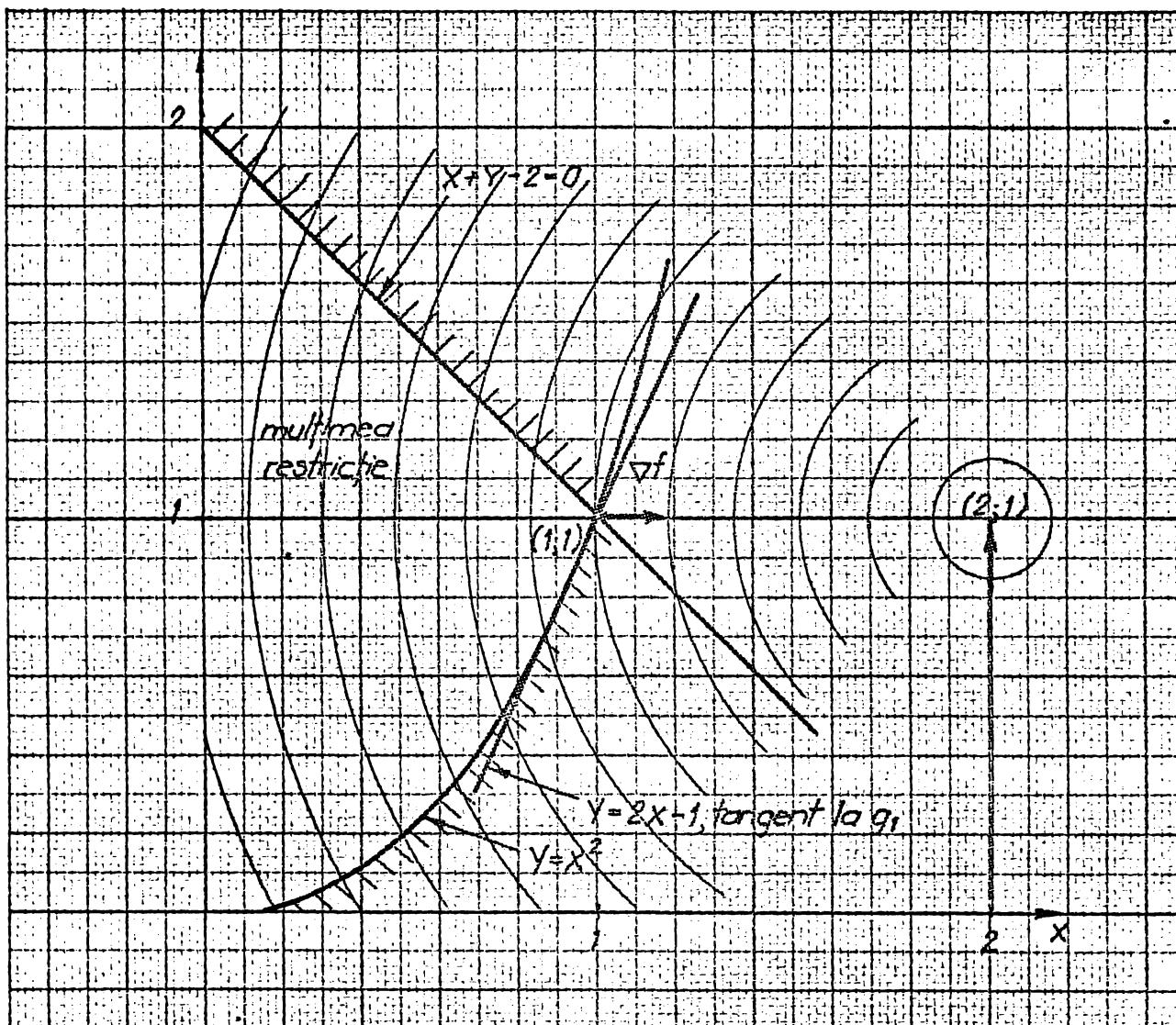
$$f(x,y) = (x-2)^2 + (y-1)^2$$

în raport cu:

$$g_1(x,y) = -y + x^2 \leq 0 \quad (155)$$

$$g_2(x,y) = x + y - 2 \leq 0$$

Problema este ilustrată geometric în fig. 11.



- Fig. 11 -

Este evident că optimul este în punctul $(1,1)$ de intersecție a celor două restricții. Se definește o direcție admisibilă ca fiind un vector, astfel încât, o deplasare mică de-a lungul lui nu modifică restricțiile. Pentru $(1,1)$ multimea tuturor direcțiilor admisibile se găsește cuprinsă între dreapta $x + y - 2 = 0$ și tg. la $y = x^2$ în $(1,1)$, adică dreapta $y = 2x - 1$. Cu alte cuvinte, această multime este conul generat de aceste drepte.

Vecorul $-\nabla f$ indică direcția vitezei maxime de descreștere a lui f , iar orice deplasare mică de-a lungul oricărei direcții care face cu $-\nabla f$ un unghi mai mic de 90° îl va descrește pe f . Astfel, în punctul de optim, nici o deplasare admisibilă nu poate forma cu $-\nabla f$ un unghi mai mic de 90° .

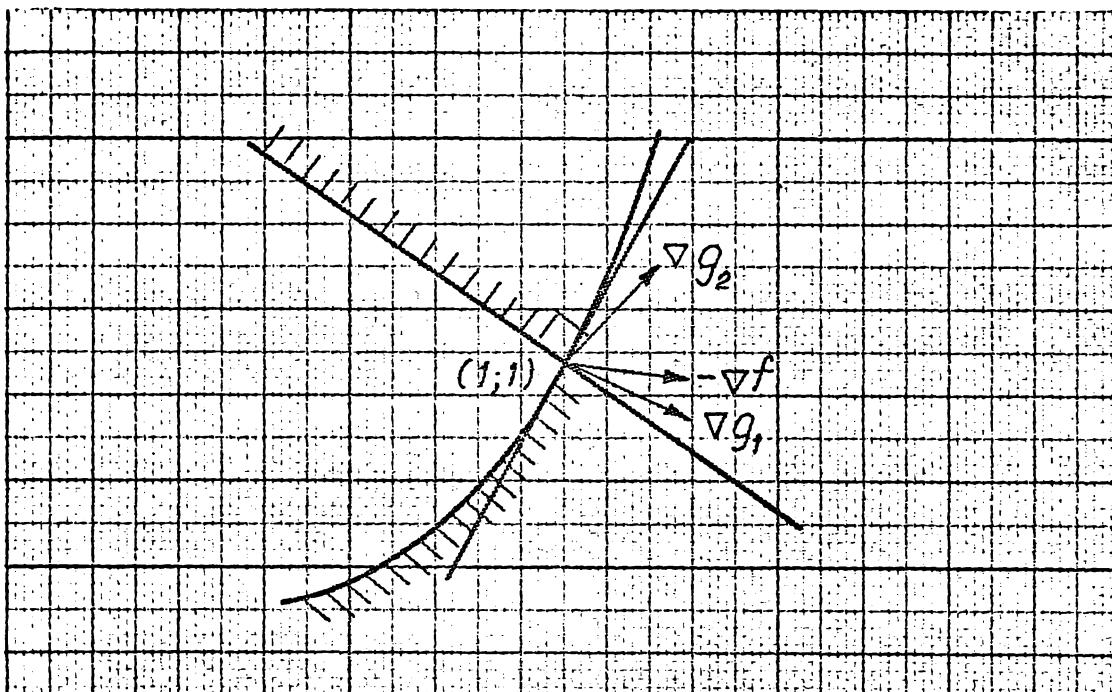


Fig.12 - Gradientul funcției obiectiv este situat în conul convex

Să considerăm fig. 12 în care au fost trasați vectorii ∇g_1 și ∇g_2 . Vectorul $-\nabla f$ este conținut în conul generat de ∇g_1 și ∇g_2 . Ce s-ar întâmpla dacă nu ar fi așa? Dacă $-\nabla f$ să ar găsi cu puțin deasupra lui ∇g_2 ? El ar face unghi mai mic de 90° cu o direcție admisibilă situată sub dreapta $x + y - 2 = 0$.

Dacă $-\nabla f$ să ar găsi cu puțin dedesubtul lui ∇g_1 , el ar face un unghi mai mic de 90° cu o direcție admisibilă situată deasupra dreptei $y = 2x - 1$. Nici unul din aceste cazuri nu poate avea loc într-un punct optimal și ambele se exclud, dacă și numai dacă $-\nabla f$ se găsește în interiorul conului generat de ∇g_1 și ∇g_2 . Desigur, este același lucru cu a afirma că ∇f se găsește în conul generat de $-\nabla g_1$ și $-\nabla g_2$.

Acesta este enunțul ușual al condițiilor K-T, adică dacă f și toate funcțiile g_j sunt diferențiabile, atunci o condiție necesară pentru ca un punct X^0 să fie un minim cu restricții al problemei:

să se minimizeze $f(X)$

în raport cu:

$$g_j(X) = 0 \quad j = 1, \dots, m \quad (156)$$

este ca, în x^0 , vectorul ∇f să fie conținut în conul generat de gradientii negativi ai restricțiilor active. (Restricțiile active sunt cele care în x^0 se realizează cu egalitate).

2.1.3. Anunțarea algebrică a condițiilor K - T.

Considerind problema minimizării funcției:

$$F(X) = F(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (157)$$

în prezența restricțiilor de egalitate:

$$g_j(X) = g_j(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad j = 1, 2, \dots, m < n \quad (158)$$

în ipoteza că funcțiile $F(X)$ și $g_j(X)$ admit derivate partiale de ordinul întâi față de toate variabilele x_i și folosind metoda multiplicatorilor Lagrange, se definește funcția auxiliară:

$$\phi(X, \lambda) = F(X) + \sum_{j=1}^m \lambda_j g_j(X) \quad (159)$$

în care $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$ sunt multiplicatorii Lagrange.

Un punct staționar al funcției ϕ în raport cu toți x_i și λ_j , punct care poate fi un minim, se obține rezolvând sistemul care rezultă prin egalarea cu zero a derivatelor partiale de ordinul întâi.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \phi(X, \lambda)}{\partial x_i} = \frac{\partial F(X)}{\partial x_i} + \sum_{j=1}^m \lambda_j \frac{\partial g_j(X)}{\partial x_i} = 0 \\ \\ i = 1, 2, \dots, n \\ \\ \frac{\partial \phi(X)}{\partial \lambda_j} = g_j(X) = 0; \quad j = 1, 2, \dots, m \end{array} \right. \quad (160)$$



Acstea reprezintă condiții necesare pentru minim. Dacă funcția $F(X)$ este convexă iar restricțiile $g_j(X)$ liniare sau convexe, aceste condiții sunt și suficiente (25); (56); (68).

Kuhn și Tucker au extins conceptul multiplicatorilor Lagrange și pentru cazul restricțiilor date sub formă de inegalități.

Cu ajutorul a m variabile auxiliare reale w_j , inegalitățile sunt transformate în egalități:

$$g_j(X) + w_j^2 = 0, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (161)$$

Aplicând metoda multiplicatorilor Lagrange se definește funcția auxiliară:

$$\varphi(X, w, \lambda) = F(X) + \sum_{j=1}^m \lambda_j (w_j^2 + g_j(X)) \quad (162)$$

care conduce la un punct staționar în ipoteza:

$$\frac{\partial \varphi(X, w, \lambda)}{\partial x_i} = \frac{\partial F(X)}{\partial x_i} + \sum_{j=1}^m \lambda_j \frac{\partial g_j(X)}{\partial x_i} = 0$$

$$i = 1, 2, \dots, n;$$

$$\frac{\partial \varphi(X, w, \lambda)}{\partial \lambda_j} = g_j(X) + w_j^2 = 0$$

$$j = 1, 2, \dots, m \quad (163)$$

$$\frac{\partial \varphi(X, w, \lambda)}{\partial w_j} = 2 \lambda_j w_j = 0$$

$$j = 1, 2, \dots, m$$

Intrucit mărimile w_j sint variabile auxiliare, acestea pot fi eliminate din sistemul (163). Din cea de-a doua relație a acestui sistem, rezultă că oricare ar fi j , condiția $g_j(X)=0$ are loc numai dacă $w_j = 0$, sau ținind seama și de ultima relație obținem:

$$\lambda_j g_j(X) = 0 \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (164)$$

Prin eliminarea variabilelor w_j din sistemul (163) rezultă condițiile necesare pentru minim :

$$\frac{\partial F(X)}{\partial x_i} + \sum_{j=1}^m \lambda_j \frac{\partial g_j(X)}{\partial x_i} = 0$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

$$g_j(X) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (165)$$

$$\lambda_j g_j(X) = 0 \quad j = 1, 2, \dots, m$$

cărora Kuhn și Tucker le-a adăugat în plus:

$$\lambda_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (166)$$

relații cunoscute sub denumirea de condițiile Kuhn - Tucker. Aceste condiții sunt necesare atât pentru minim local cât și pentru minim global. Dacă funcțiile $F(X)$ și $g_j(X)$ sunt convexe ele devin condiții necesare și suficiente pentru un minim global.

Din interpretarea geometrică a condițiilor K-T rezultă că pentru ca vectorul ∇f să se găsească în conul descris (fig.12) acesta trebuie să fie o combinație liniară-negativă a gradientilor negativi ai restricțiilor active; adică trebuie să existe numerele λ_j , astfel încât:

$$\nabla f(x^0) = \sum_{j \in J} \lambda_j^0 (-\nabla g_j(x^0)) \quad (167)$$

unde:

$$\lambda_j^0 \geq 0, \quad j \in J \quad (168)$$

unde J este mulțimea indicilor restricțiilor active.

Aceste rezultate se pot reformula pentru a include toate restricțiile, definind coeficientul $\lambda_j^0 = 0$ dacă $g_j(x^0) < 0$.

Se observă acum că $\lambda_j^0 \geq 0$, dacă $g_j(x^0) = 0$ și $\lambda_j^0 = 0$ dacă $g_j(x^0) < 0$ adică produsul $\lambda_j^0 g_j(x^0)$ este zero pentru toți $j = 1, 2, \dots, m$.

Condițiile (167); (168) devin:

$$\nabla f(x^0) = \sum_{j=1}^m \lambda_j^0 (-\nabla g_j(x^0)) \quad (169)$$

$$\lambda_j^0 \geq 0, \quad \lambda_j^0 g_j(x^0) = 0, \quad g_j(x^0) \leq 0 \quad (170)$$

$$j = 1, \dots, m$$

Relațiile (169) - (170) reprezintă forma ușoară de enunțare a condițiilor K - T pornind de la interpretarea geometrică și făcând uz de gradient.

2.2. Metode numerice pentru găsirea minimului cu restricții

Au fost elaborate o varietate de metode, folosite în anumite cazuri particulare, legate de forma funcției obiectiv $F(X)$ și/sau a relațiilor de restricții $g_j(X)$. Ele pot fi împărțite în două categorii:

- (1). Metode directe cu aplicabilitate expresă unor anumite forme ale funcției obiectiv și/sau ale relațiilor de restricții.

(2). Metode indirecte prin care problema de optimizare în prezență restricțiilor este transformată într-o problemă de optimizare fără restricții, aplicîndu-se apoi unul din algoritmii specificați în paragrafele anterioare.

2.2.1. Metode directe ale programării neliniare cu restricții (25); (34); (56); (61); (68); (70).

In categoria metodelor directe se încadrează o serie de metode de optimizare dintre care amintim:

2.2.1.1. - Metoda directiilor admisibile

2.2.1.2. - Algoritmul lui Kleibohm

2.2.1.3. - Algoritmul lui Rosen

2.2.1.4. - Metoda planelor secante

2.2.1.5. - Metoda centrelor lui Huard

2.2.1.6. - Metoda complex a lui Box

Observații: Din lipsă de spațiu am făcut doar o trecere în revistă a metodelor directe deoarece nu se pretează la rezolvarea problemei noastre și vom prezenta algoritmul COMPLEX eficient în cazul în spate.

2.2.1.6. Metoda Complex, elaborată de J.M. Box (16);(34); (56).

Este o extindere la cazul optimizării cu restricții a metodei simplex pentru a lua în considerare restricții sub formă de inegalități:

$$g_i \leq x_i \leq h_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (171)$$

$$G_j \leq \varphi_j(x) \leq H_j \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (172)$$

unde:

g_i, h_i, G_j, H_j , sunt constante sau funcții de:

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \quad (173)$$

După cum se știe „Simplex-ul” este un n - edru generat de $n+1$ puncte (n fiind numărul variabilelor) în spațiu n - dimensional.

Metoda Simplex, pentru minimizarea fără restricții a funcțiilor neliniare evaluează valoarea funcției $f(x)$ în vîrful simplexului și înlocuiește vîrful în care funcția are cea mai mare valoare - în ipoteza căutării minimului - cu un punct în care funcția are valoare mai mică, căutând ca simplexul inițial generat să fie deplasat în regiunea minimului.

Odată situat în această regiune, simplexul se contractă variind în formă și dimensiune, în conformitate cu geometria locală a funcției obiectiv, permitând o aproximare a minimului și o eventuală determinare a lui printr-o interpolare cu o funcție patratică.

Una dintre diferențele dintre metoda complex și metoda simplex constă în aceea că în metoda complex se extinde simplexul la un complex de $N > n+1$ puncte. Se recomandă $N = 2n$.

Să presupună că un punct inițial x^1 care satisface toate restricțiile este cunoscut. Celelalte puncte ale complexului inițial sunt generate pe rînd cu ajutorul relației:

$$x_i^k = g_i + r_i^k (h_i - g_i), \quad (174)$$

$$i = 1, 2, \dots, n, \quad k = 2, 3, \dots, N$$

unde r_i^k sunt numere pseudoaleatoare rectangular distribuite pe intervalul $[0,1]$. În (174) x_i^k înseamnă componentă i -a punctului x^k . Punctul x^k , de componente x_i^k , satisface restricțiile explicite. Dacă el nu satisface restricțiile implicite, atunci este contractat cu $\beta = \frac{1}{2}$, la jumătatea distanței dintre el și centroidul (x_o^k) punctelor care deja satisfac toate restricțiile înlocuind x_h^k cu:

$$x_c = x_0 + \beta (x_h - x_0) \quad 0 < \beta < 1 \quad (175)$$

unde:

$$x_0 = \frac{\sum_{j=1}^N x_i^k - x_h^k}{n} \quad i \neq h \quad (176)$$

iar x_h^k este vîrful care corespunde lui $f(x_h^k) = \max f(x_i^k)$;

$i = 1, \dots, N$. Operația de contractie este repetată pînă cînd punctul obținut satisface toate restricțiile, generînd astfel toate vîrfurile complexului.

Box descrie algoritmul Complex, astfel:

Se evaluează funcția în fiecare vîrf, iar punctul x_h cu cea mai mare valoare, este super reflectat cu ajutorul formulei:

$$x_r = x_0 + \alpha (x_0 - x_h) \quad (\alpha \gg 1) \quad (177)$$

unde x_0 este centroidul tuturor punctelor în afară de x_h ; Dacă în acest punct $f(x_r) > f(x_s)$ unde x_s este punctul cu cea mai mare valoare a funcției, abstractie făcînd de x_h , se înlocuiește x_r cu un alt punct la jumătatea distanței dintre el și centroid iar procedeul se repetă pînă, sau, se obține un punct cu $f(x_r) \leq f(x_s)$ sau unele restricții sănt violate.

Dacă un astfel de vîrf nu satisface o restricție explicită, variabilei corespunzătoare acestei restricții îi este atribuită o valoare egală cu $\pm 10^{-5}$ înăuntrul limitei corespunzătoare.

Dacă o restricție implicită nu e satisfăcută, vîrful în cauză este mutat la jumătatea distanței dintre el și centroidul celoralalte vîrfuri.

Box indică criteriul de stop, acela de a opri procesul interativ atunci cînd s-au realizat cinci valori consecutive ale funcției care diferă cu o acurateță dată $|R - Q| < EPS$ unde pentru centroidul considerat R este punctul cu c.m.m. valoarea a funcției, Q cu cea mai mică valoare și EPS termenul de convergență.

Box consideră de asemenea că cele mai bune valori ale parametrilor ar fi $N = 2n$ și $\alpha = 1,3$.

Pentru $\alpha = 1,3$ se produce o super reflectie și prin această operație de expansiune, întâlnită la metoda simplex este eliminată, fapt ce reduce durata unei iteratii.

2.2.2. Metode indirecte de programare neliniară cu restricții (25);(34);(56);(64);(70);(40);(41);(42)

Ideea de bază a metodelor indirecte de programare neliniară cu restricții constă în a găsi un procedeu de transformare a problemei de optimizare condiționată /cu restricții/ într-o problemă echivalentă de programare neliniară necondiționată / fără restricții/.

Efortul preocupărilor în această direcție se justifică prin faptul că în domeniul programării nelineare, fără restricții, au fost elaborați o serie de algoritmi foarte eficienți, chiar pentru funcții cu mare grad de nelinieritate având curbe de nivel foarte excentrice, pe cind algoritmii elaborați pentru optimizări condiționate sunt specifici anumitor categorii de probleme, presupunând condiționarea liniarității fie pentru funcția obiectiv fie pentru funcțiile de constrângere.

In cadrul modelelor indirecte locul central îl ocupă:

2.2.2.1. Tehnicile bazate pe funcții de penalizare

Problema:

Să se minimizeze $f(x)$ în raport cu (178)

$$g_j(x) \geq 0 ; \quad i = 1, \dots, m \quad (179)$$

poate fi abordată într-un mod cu totul diferit decât în metodele prezentate anterior.

Se definește funcția de „penalizare”:

$$\varphi(y) = \begin{cases} 0 & y \geq 0 \\ \infty & y < 0 \end{cases} \quad (y = g_j(x)) \quad (180)$$

și se consideră problema minimizării funcției:

$$\Psi(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}) + \sum_{j=1}^m \varphi(g_j(\mathbf{x})) \quad (181)$$

fără nici o restricție. Evident dacă toate restricțiile $g_j(\mathbf{x}) \geq 0$ sunt satisfăcute, atunci al doilea termen din sumă nu contribuie cu nimic și minimizarea lui $\Psi(\mathbf{x})$ este echivalentă cu minimizarea lui $f(\mathbf{x})$. Dacă un $g_j(\mathbf{x}) < 0$, atunci $\varphi(g_j) = \infty$ și vom fi departe de minim. Astfel, orice procedeu care minimizează pe Ψ nu va alege niciodată un punct din afara mulțimii restricției, ci va detecta de fapt acel punct din mulțimea restricției, care minimizează pe $f(\mathbf{x})$. În felul acesta o problema cu restricții se rezolvă folosind minimizarea fără restricții bine puse la punct, o astfel de abordare prezintă interes.

Apar totuși dificultăți, a căror depășire nu este întotdeauna simplă.

ACESTE dificultăți se pot atenua alegînd o funcție de penalizare mai puțin „rigidă” care să aibă proprietățile de regularitate necesare. De exemplu funcția:

$$\langle y \rangle^2 = \begin{cases} 0 & y \geq 0 \\ y^2 & y < 0 \end{cases} \quad \text{este convenabilă.} \quad (182)$$

Ea este continuă și are derivată continuă pentru toate valorile y . Desigur, deoarece penalizarea restricțiilor încălcate nu este infinită, pot apărea anumite încălcări. Pentru a le reduce se va înmulții funcția de penalizare (182) cu o constantă pozitivă mare k . Atunci, problema fără restricții pe care trebuie să-o rezolvăm este:

să se minimizeze

$$f(\mathbf{x}) + k \sum_{j=1}^m \langle g_j(\mathbf{x}) \rangle^2 \quad (183)$$

Dificultatea indusă de existența curbelor de nivel excentrice se menține și în acest caz.

Cercetările recente pledează pentru o variantă slăbită a acestei metode. În locul rezolvării unei singure probleme fără restricții se rezolvă un sir de astfel de probleme, fiecare apropiindu-se și mai mult de soluția finală. Rezultatul final este o procedură mai eficientă pentru rezolvarea problemelor de minimizare cu restricții. În exemplul (183) se alege un $k_0 > 0$ initial nu prea mare și se face minimizarea.

La pasul i , se alege $k_i > k_{i-1}$ și se repetă minimizarea cu $k_j \rightarrow \infty$ cînd $j \rightarrow \infty$. În general sirul de minime fără restricții converge către soluția problemei cu restricții.

Pentru funcția de penalizare (182) soluțiile intermediiare încalcă restricțiile. Astfel metoda abordează minimul cu restricții din afara mulțimii restricție. În multe cazuri ea poate fi nesatisfăcătoare. Dacă anumite încălcări ale restricțiilor nu sunt permise, atunci este posibil ca uneori să nu putem folosi soluțiile intermediiare.

Metoda va fi ineficientă în cazul în care obiectivul și restricțiile nu are în exteriorul mulțimii restricție proprietăți de regularitate „suficient de bune” de asemenea metoda este inaplicabilă atunci cînd aceste funcții nu sunt definite în exteriorul mulțimii restricție.

2.2.2.2. Metoda Fiacco-Mc.Cormick (SUMT)

În momentul de față se utilizează frecvent o metodă care evită aceste dificultăți, abordînd optimul dinspre interiorul mulțimii restricție.

Să definește funcția:

$$P(x, r) = f(x) + r \sum_{j=1}^m \frac{1}{g_j(x)} \quad (184)$$

sau:

$$L(x, r) = f(x) - r \sum_{j=1}^m \ln(g_j(x)) \quad (185)$$

unde $r > 0$. Se alege $r_1 > 0$ și x_0 strict în interiorul mulțimii restricție. Se consideră problema minimizării fără restric-

ții a acestei funcții, cu x_0 punct initial. Intuitiv, este de așteptat să existe un minim al lui $P(x, r_1)$ interior multimii restricției, deoarece pe frontieră acesteia, adică dacă $g_j(x) = 0$ pentru un anumit j , avem $P(x, r_i) \rightarrow +\infty$.

Astfel traекторia coborîrii celei mai rapide din x_0 adică o traекторie pe care $P(x, r_1)$ este strict descrescătoare nu poate străpunge frontieră multimii restricției. Punctul de minim depinde bineînțeles de r_1 și va fi notat $x(r_1)$. Conform argumentelor de mai sus, $x(r_1)$ este interior multimii restricție. Să considerăm repetarea acestui proces de minimizare pentru un sir de valori ale lui $r : r_1 > r_2 > \dots > r_k > p$. Fiecare punct de minim $x(r_k)$ va fi strict interior multimii restricție. În plus, prin micșorarea lui r influența termenului

$$r \sum_{i=1}^m 1/g_j(x), \text{ care } \text{"penalizează" apropierea de frontieră multimii restricție, se reduce, și în minimizarea lui } P$$

efortul principal se concentrează asupra micșorării lui f . Astfel, sirul de puncte $x(r_1), x(r_2), \dots, x(r_k)$ se poate apropiă din ce în ce mai mult de frontieră multimii R , dacă aceasta este avantajos pentru reducerea lui f . Este de așteptat că pe măsură ce r se apropiă de zero, punctul de minim $x(r)$ să se apropii de soluția problemei originale (178); (179).

O astfel de metodă prezintă interes în special atunci cînd avem de considerat restricții pronunțat neliniare, deoarece apropierea de valoarea soluției se face dinspre interiorul multimii restricție.

Se elimină în felul acesta, complet, mișcarea de-a lungul frontierelor acestei multimi, care poate fi supărătoare în cazul în care curbura frontierelor este pronunțată.

Fiacco și Mc. Cormick au demonstrat că, în anumite ipoteze, considerațiile de mai sus sunt valabile.

In particular, se arată că dacă:

- (1). interiorul multimii restricție este nevid;
- (2). funcțiile f și g admit derivate partiale de ordinul al doilea continue;
- (3). multimea punctelor din multimea restricție pentru care $f(x) \leq k$ este mărginită pentru toți k .

(4). funcția f este mărginită inferior pentru x în mulțimea restricție, atunci pentru orice $r > 0$ există cel puțin un minim local finit al lui $P(r, x)$ în interiorul mulțimii restricție. Pentru a demonstra mai mult este necesar să introducem ipotezele uzuale de convexitate, adică,

(5). $f(x)$ este convexă;

(6). funcțiile $g_j(x)$ sunt concave;

(7). $P(x, r)$ este strict convexă în interiorul mulțimii restricție pentru orice $r > 0$.

Condițiile 5-6 garantează că problema (178) - (179) este de programare convexă. Pentru o astfel de problemă, orice minim local este minim global. Condiția 7, nu este implicată de 5-6, dar pentru satisfacerea ei este suficient să fie satisfăcuțe cîteva cerințe suplimentare puțin restrictive (42). Se arată (42), că valorile $P(x(r_1), x_1), \dots, P(x(r_k), x_k), \dots$ converg către v_0 , valoarea minimului cu restricții a lui $f(x)$ atunci cînd $r_k \rightarrow 0$. În plus, se arată că:

$$f(x(r_{k+1})) \leq f(x(r_k)) \quad (186)$$

adică este monoton necrescătoare atunci cînd r scade.

Fiacco și Mc.Cormick sugerează ca, dat fiind x^0 , în cazul funcției (184), r să fie determinat cu relația:

$$r_1 = \frac{(\nabla f(x^0))^T \nabla \sum_j^{-1} g_j^{-1}(x^0)}{(\nabla g_j^{-1}(x^0))^2} \quad (187)$$

cu condiția ca $r > 0$. Alți autori (89);(25);(34) recomandă pentru r rația de 4 respectiv 10.

3. Analiza comparativă a eficienței algoritmilor (34)

Prin eficiența unui algoritm se înțelege, în prezența analiză comparativă, capacitatea sa de a rezolva problema cu o anume acurateță respectiv precizia dată și cu cheltuiala de timp minimă pentru om și mașină.

Cheltuiala de timp se consideră a fi proporțională cu numărul de evaluări ale funcției (N_f), plus de n ori numărul de evaluări ale gradientului (nN_g), unde n este numărul de variabile, deci:

$$N_e = N_f + nN_g$$

Studiul eficienței algoritmilor se efectuează pe probleme test cunoscute pentru gradul lor de dificultate.

In (34) se face o analiză comparativă a eficienței unor importanți algoritmi pe 3 probleme test.

In cazul primei probleme se compară metoda SUMT folosind algoritmii: D.F.P.; F.- R. și Powell, cu metoda lui Rosen și metoda Complex, în problema a două cu restricții neliniare se compară metoda SUMT - folosind algoritmi D.F.P. și F.R. cu metoda Complex, iar în cea de-a treia se compară SUMT - D.F.P., SUMT-F.R. cu metoda Rosen.

Din această analiză comparativă se poate desprinde constatărea : cei mai eficienți algoritmi de optimizare fără restricții sunt cei mai eficienți și în tehnica SUMT iar un algoritm specializat unei probleme cu structură specială (exemplu Rosen) este mai eficient decât metoda SUMT.

Observații: Metoda Rosen nu e indicată pentru funcții cu un grad mare de neliniaritate.

Metoda Complex a lui Box este mai înceată decât celelalte în cazul problemelor test studiate în schimb s-ar părea că este indicată atunci când problema se cere rezolvată cu o foarte bună precizie.

Intrucât problema optimizării proiectării motoarelor de inducție cu rotor în dublă colivie, este o problemă de programare neliniară cu restricții neliniare rezultă că dintre metodele

analizate pot concura la rezolvare acele metode directe care nu impun condiții de liniaritate funcției obiectiv sau restricțiilor, cum este metoda Complex și metoda SUMT combinată cu unul din algoritmii cei mai eficienți, studiați în paragraful optimizării fără restricții.

CAP. E - MODELUL MATEMATIC

/30/; /31/; /76/; /77/; /73/; /78/; /84/;
/85/; /95/; /46/; /114/; /89/; /9'/; /124/; /125/; /126/

Precizare. Modelul matematic se referă la un motor asincron cu rotor în dublă colivie; coliviile sunt realizate din aluminiu prin procedeul de turnare sub presiune și au inelele de scurtcircuitare comune.

1. Proiectul initial al motorului (PRIMO)

In orice metodă de programare nelinieră procesul iterativ porneste de la un punct initial, aşa numitul punct de start (x^0).

De subliniat faptul că prin punct de start se înțelege vectorul de poziție n - dimensional ale cărui componente sunt cele n variabile independente ($x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0$) care definesc soluția initială a problemei, în cazul nostru motorul initial.

Intuitiv se poate deduce că x^0 poate fi definit în două ipostaze și anume:

- a. reprezintă parametrii fizici ai unui motor existent, ce urmează a fi optimizat, și
- b. reprezintă parametrii unui motor, care nu a fost încă construit, parametrii obținuți prin calcul, printr-o metodă oarecare.

Evident că cea de a doua ipostază reprezintă cazul general în proiectarea optimală.

Tot în programarea nelinieră se demonstrează faptul că probabilitatea atingerii optimului global (în spățiu minim - minimum) printr-un algoritm adecuat, dat sau ales, este cu atât mai mare cu cât punctul de start este mai aproape de acest optim, în orice caz condiția necesară prevede ca punctul respectiv să fie situat în interiorul domeniului admisibil definit de funcții-le restricție.

In concluzie se desprinde cu claritate ideea de bază că proiectul inițial trebuie să sintetizeze un motor realizabil, în sensul că parametrii de ieșire ai acestuia să fie corect calculați, să satisfacă limitările impuse și bineînțeles să fie realizabil din punct de vedere constructiv și tehnologic.

1.1. Descrierea succintă a metodei de proiectare și a programului PRIMO (Proiect inițial motor)

In elaborarea metodei de proiectare și a programului PRIMO am căutat să fie respectate condițiile expuse în paragraful precedent.

Metodica de proiectare este împărțită în șase capitole ce vor fi enumerate, cu specificații de conținut, în cele ce urmează.

1.1.1. Datele fundamentale ale mașinii

1.1.1.1. Date electrice - cum sunt: puterea, tensiunea de alimentare, frecvența, numărul de poli, etc., mărimi ce reprezintă date de intrare pentru programul PRIMO.

1.1.1.2. Date constructive - în care se calculează pasul polar, diametrele, lungimea, intrefierul, numărul de crestături în stator și rotor precum și forma crestăturilor.

Observații: - Numărul de crestături Z_1 și Z_2 se determină ținând cont de o serie de factori, cum sunt: reactanțele, cuplurile parazite sincrone și asincrone, zgomote și vibrații precum și limitările tehnologice.

Forma și secțiunea crestăturilor se determină pornind de la caracteristicile de ieșire impuse (M_p , I_p , s , $\cos\varphi$, etc) și de la valorile inductiilor admisibile în special în zona dintilor.

De subliniat faptul că pentru rotorul cu bare finale autorul a elaborat o nouă formă de crestături - trapez - dreptunghi sau dublu trapez cu performanțe ridicate la pornire.

Modul în care se determină numărul de crestături precum și secțiunea acestora constituie subruteine pentru programul PRIMO.

1.1.1.3. Datele bobinajului - aici se calculează numărul de spire pe fază, pasul de bobinaj, rezistența ohmică și reactanța înfășurării statorice. Tot aici se definitivează geometria transversală a rotorului și se calculează parametrii fizici ai acestuia.

Observații: Pentru pasul de bobinaj s-a introdus metoda optimală Y_{opt} aparținând autorului, metoda reprezentând o importantă subrutină pentru programul PRIMO.

1.1.2. Calculul curentului de magnetizare

In acest capitol a fost introdusă o procedură specială pentru calculul lui I_μ , în special în dintii celor două armături, cu ridicarea experimentală a curbei de magnetizare a obiectului pentru miezul magnetic, măsurările făcîndu-se pe un număr mare de esantioane.

Procedura a fost transpusă în subrutina MAGNET pentru programul PRIMO.

1.1.3. Calculul curentului de scurtcircuit

Se referă, în ce privește rotorul, la toate tipurile de colivii: simplă, cu bare înalte și dublă colivie.

1.1.4. Determinarea caracteristicilor de mers în gol

Se lucrează cu pierderile specifice în fier măsurate efectiv pe esantioane. Se redau relații pentru pierderile de suprafață și prin pulsăție.

1.1.5. Determinarea rezistențelor și reactantelor ținînd cont de refularea curentului în colivia rotorică și de saturarea căilor de dispersie la pornire

Se dău relații de calcul pentru diverse tipuri de crestături atât pentru rotorul cu crestături adânci cât și pentru cel cu dublă colivie.

1.1.6. Calculul parametrilor de pornire și de regim

Relațiile specifice din literatura de specialitate au fost completate cu coecienți de corecție obținuți pe bază statistică dintr-o mulțime de încercări de lot și de tip.

1.2. Schema logică bloc a programului PRIMO

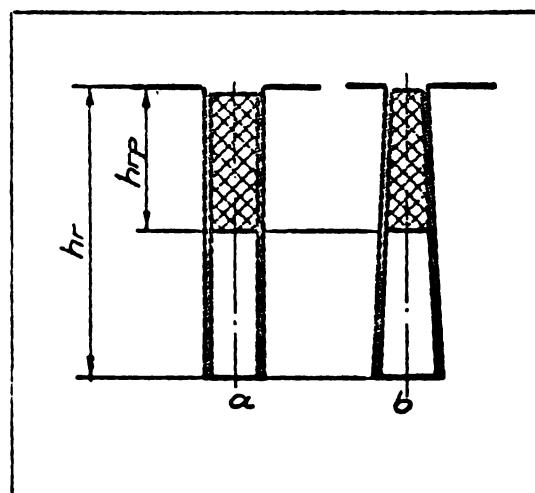
Intrucit întinderea lucrării nu permite redarea în întregime a metodicii de proiectare elaborate și a programului PRIMO, pentru metodică ne-am rezumat la această succintă prezentare iar pentru programul PRIMO se redă în anexa 7 schema logică bloc a acestuia.

1.3. Definirea unui nou tip de crestătură pentru motorul cu bare înalte, respectiv pentru coliviile de lucru a motorului cu dublă colivie

Cu toate avantajele pe care le prezintă crestătura adâncă de formă dreptunghiulară sunt cazuri unde nu pot fi respectate condițiile impuse caracteristicilor de pornire.

După unii autori (78); (95), o bară înaltă având secțiunea în formă de trapez cu baza mică spre întrefier este cu mult mai avantajoasă referitor la parametrii de pornire (M_p , I_p) decât o bară dreptunghiulară având aceeași înălțime.

Intr-adevăr, înălțimea de refulare (h_{rp}) rămînind aceeași, rezultă în cazul barei trapezoidale o secțiune activă la pornire mai mică decât la bara dreptunghiulară respectiv o rezistență mai mare, fig. (13).



Raportul rezistenței în c.a. față de rezistență în c.c. se determină pornind de la legile lui Maxwell:

$$\text{rot } \bar{H} = \bar{J}$$

$$\text{rot } \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} = -\mu \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} \quad (188)$$

unde:

\bar{H} - intensitatea cîmpului magnetic de dispersie al barei

\bar{J} - densitatea de curent într-un punct al barei, în secțiunea transversală;

\bar{E} - intensitatea cîmpului electric într-un punct al secțiunii transversale a barei;

\bar{B} - inducția magnetică;

t - timpul; μ - permeabilitatea mediului

Obs. \bar{H} , \bar{J} , \bar{E} și \bar{B} sunt mărimi vectoriale.

Rezolvînd sistemul se obțin două ecuații Bessel ale căror soluții sunt funcții de forma:

$$j_m = A_0 J_0(X) + B_0 N_0(X) \quad (189)$$

$$H_m = A_1 J_1(X) + B_1 N_1(X)$$

unde:

j_m și H_m - sunt amplitudinile densității de curent și a cîmpului magnetic (presupuse sinusoidale)

Să lucrează cu valori complexe.

$J_0(X)$, $N_0(X)$ - sunt funcțiile Bessel de prima și a doua specie, de ordinul zero.

$J_1(X)$, $N_1(X)$ - funcțiile Bessel de prima și a doua specii, de ordinul unu.

A_0, B_0, A_1 și B_1 - constante, ce se determină din condițiile initiale.

OBS. Valorile numerice ale funcțiilor Bessel sunt date în tabele de funcții speciale, ca de ex.: Tabele de funcții speciale de Jahnke și Emde sau în Manualul inginerului, vol. I, pag. 125-128, Ed.Tehnică, București, 1965.

Având valorile lui \underline{H} și \underline{j} respectiv \underline{E} , $\underline{E} = \underline{\sigma} \underline{j}$, ($\underline{\sigma}$ - rezistivitatea materialului barei), putem scrie expresia vectorului lui Poynting, care caracterizează densitatea fluxului de energie electromagnetică, ce intră, în unitatea de timp, pe unitatea de arie a barei aflată în crestătură.

Vectorul Poynting are expresia:

$$\underline{S} = \underline{E} \times \underline{H} \quad (190)$$

în cazul cînd operăm cu mărimi vectoriale.

Dacă se lucrează cu valori complexe mărimea acestei energii este cu produsul complex al vectorului \underline{E} prin vectorul conjugat al lui \underline{H} :

$$\underline{S} = \underline{E} \underline{H}^* \quad (190a)$$

Efectuînd calculele intermediare vectorul Poynting se poate scrie sub forma:

$$S = I^2 (R_a - J \omega L_a) \quad (191)$$

în care:

R_a - este rezistența în cazul efectului pelicular;

ωL_a - reactanța în cazul efectului pelicular.

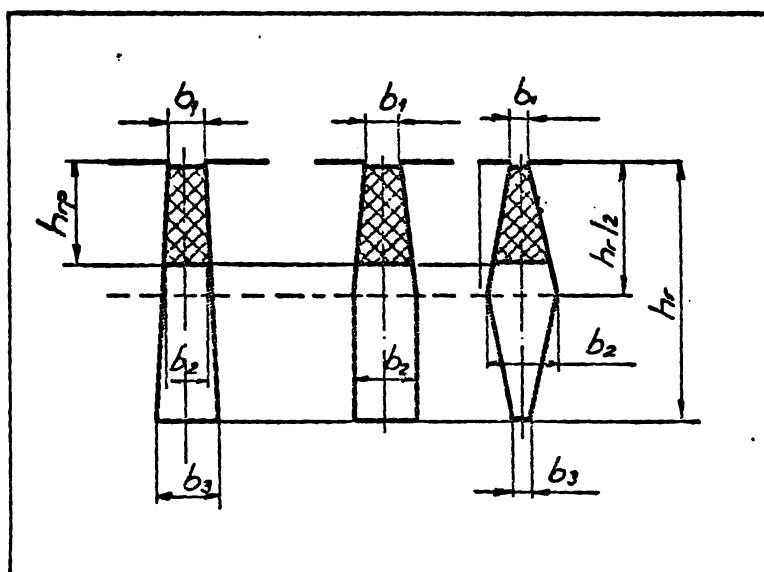
Rezistența și inductanța corespunzătoare în c.c. se calculează fără dificultăți și astfel obținem rapoartele dorite.

OBS. - Cu toate avantajele ei, crestătura trapezoidală nu se recomandă pentru mașinile de putere mică și mijloace prin faptul că îngustează mult secțiunea dintelui la bază.

Plecind de la considerentul de mai sus și ținând seama de necesitatea unor parametrii superioiri la pornire am imaginat crestăturile din fig. (14.) marcate cu b și c.

La crestătura conform 14.b. partea superioară este trapezoidală; crestătura conform 14.c. este formată din două trapeze având baza mare comună (recomandată pentru rotoare cu diametre relativ mici).

In continuare vom compara crestătura 14.b. cu crestătura trapezoidală 14.a.



- Fig. 14. -

Observăm că în ambele cazuri secțiunea activă, în cazul refulării curentului, este aproximativ aceeași, de unde și rezistențele la pornire au valori apropiate.

In cazul crestăturii alese secțiunea dintelui la bază nu mai este atât de mult slăbită ca în cazul crestături trapezoidale.

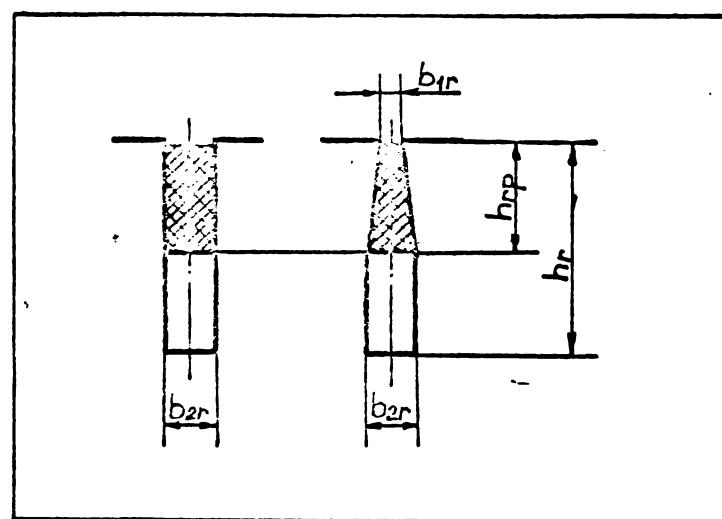
Pentru ilustrarea avantajelor noului tip de crestătură vom face o comparație în ce privește valorile rezistenței și reactanței specifice la pornire (r_p și x_p) între crestătura dreptunghiulară și crestătura adoptată.

Inălțimea raportată a crestăturii, la pornire, $\frac{h}{r}$, se calculează analog pentru ambele crestături.

Notăriile sunt conforme cu fig. (15) - în plus notăm:

h_{rp} - înălțimea redusă, la pornire, referitor la rezistență;

h_{xp} - idem, referitor la permeanță.



- Fig. 15 -

$$\xi = 2 \pi h_r \sqrt{\frac{f}{S} 10^{-5}} \quad (192)$$

cu h_r în cm

ρ în $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$

Având determinat pe ξ putem scrie:

$$h_{rp} = \frac{h_r}{\xi} ; \quad h_{xp} = \frac{3}{2\xi} h_r \quad (193)$$

(Relațiile sunt valabile în cazurile $\xi \geq 2$).

Notăm mărimile referitoare la creștăatura dreptunghiulară cu indicele "d".

$$\text{Dacă: } b_{1r} = \frac{b_{2r}}{\gamma} ; \quad \gamma > 1$$

Secțiunea activă este :

$$S_{rp} = \frac{\frac{b_2 r}{\gamma} + b_2 r}{2} \cdot h_{rp} = \frac{b_2 r (1 + \gamma)}{2 \gamma} \cdot h_{rp} =$$

$$= \frac{1 + \gamma}{2} \cdot b_2 r \cdot h_{rp} \quad (194)$$

Cum: $b_2 r \cdot h_{rp} = S_{rp_d}$

rezultă:

$$S_{rp} = \frac{1 + \gamma}{2 \gamma} \cdot S_{rp_d} \quad (195)$$

și respectiv:

$$r_{bp} = \frac{2 \gamma}{1 + \gamma} r_{bp_d} \quad (196)$$

Se observă că raportul r_{bp}/r_{bp_d} este cu atât mai mare cu cît γ este mai mare.

In cazul reactanelor putem scrie, pornind de la relația:

$$h_{xp} = h_{xpd} = \frac{3}{2 \gamma} h_r = \frac{3}{2} h_{rp}$$

$$\lambda_{rp} = \frac{2 h_{rp}}{3 (\frac{b_2 r}{\gamma} + b_2 r)} + \frac{0,5 h_{rp}}{3 b_2 r} \quad (197)$$

$$\lambda_{rp_d} = \frac{1,5 h_{rp}}{3 b_2 r} \quad (197')$$

și raportul:

$$\frac{\lambda_{rp}}{\lambda_{rp_d}} = \frac{\frac{2 h_{rp}}{3 b_2 r (\frac{1 + \gamma}{\gamma})}}{\frac{h_{rp}}{2 b_2 r}} + \frac{1}{3} = \frac{4 \gamma}{3(1 + \gamma)} + \frac{1}{3} =$$

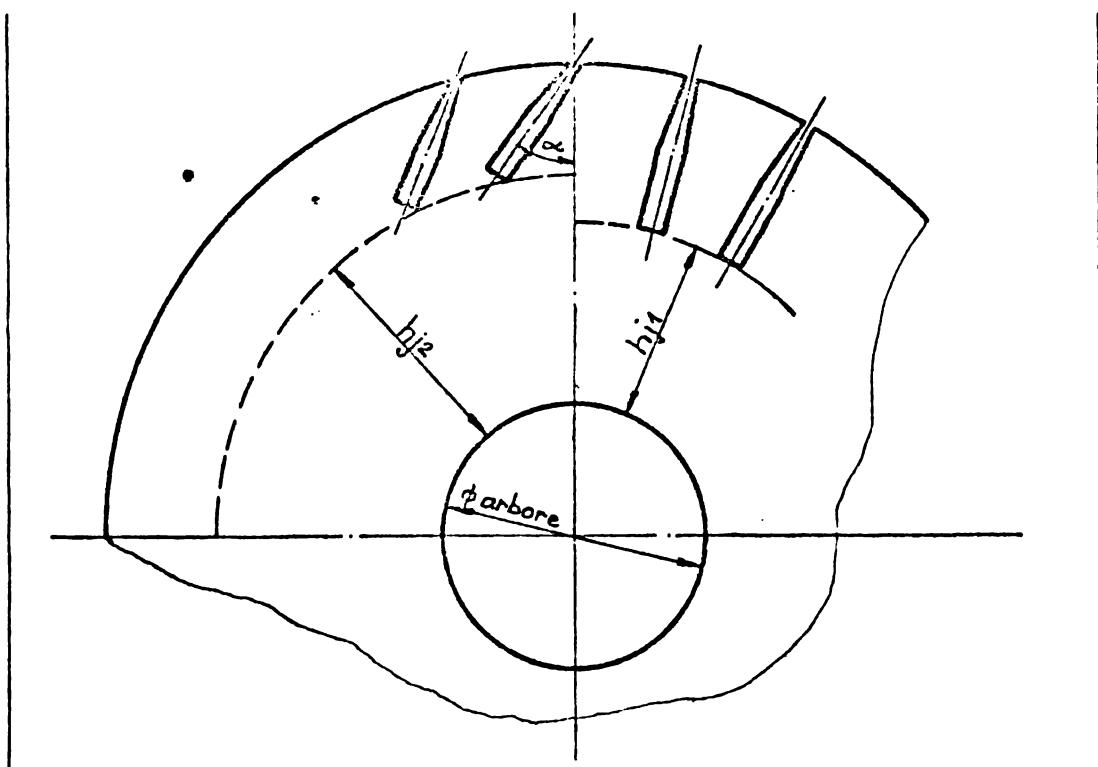
$$= \frac{2}{3} \left(\frac{2 \gamma}{1 + \gamma} + \frac{1}{2} \right) \quad (198)$$

Observație: Considerențele expuse sunt valabile pentru motoare având raportul $i_p = I_p/I_n \gg 5$.

La motoarele cu 2 poli, unde jugul rotoric este mult redus față de motoarele cu număr mai mare de poli - crestătura rotorică adâncă - reduce mult înălțimea jugului - din care cauză cresc inducțiile în jug - crește curentul de magnetizare, ceea ce atrage după sine micșorarea lui $\cos \varphi$.

Intrucât $\cos \varphi$ este de asemenea impus - în tema de proiectare - s-a recurs la un artificiu - în ceea ce privește tăla rotorică.

S-a menținut crestătura adâncă - însă aceasta nu mai este dispusă radial ci are o anumită înclinație α^o față de rază - ca în figura alăturată.



- Fig. 16 -

Prin acest artificiu jugul rotoric s-a mărit de la h_{j1} la h_{j2} - în schimb s-a micșorat puțin secțiunea dintelui la baza crestăturii.

Trebuie remarcat faptul că la 2 poli - dintii nu sunt încărcăți - deci o creștere a inducției într-o secțiune a dintelui nu are mare influență asupra lui I_μ iar pe de altă parte lungimea liniei de cîmp în jug este mult mai mare decât în dinti - deci o micșorare a inducției în această zonă influențează sensibil pe I_μ respectiv pe $\cos \varphi$.

Prin acest artificiu s-a reușit să se respecte atît M_p/M_n cît și $\cos \varphi$ impus.

Calculul refulării se face ca pentru crestătura radială, avînd aceeași configurație.

Pentru motoare avînd $i_p = 3,5 + 4,5$ este necesar ca pe lîngă alegerea unei geometrii adecvate a dublei colivii să se mai introducă și alte soluții pentru limitarea lui i_p , ca de exemplu utilizarea pentru colivie a unor aliaje cu β mare (motoare cu alunecare mărită), soluții adaptate de prof.dr.ing. I.Novac în proiectarea unor motoare speciale pentru I.I.S. Electromotor Timisoara.

2. Elaborarea funcției obiectiv ($F(Y)$) și a funcțiilor restricții ($g_j(Y)$) pentru motorul cu dublă colivie

După ce am trecut în revistă diversele metode și algoritmi ce s-au elaborat în scopul rezolvării multitudinii de probleme de minimizare sau maximizare a unor funcții neliniare cu restricții de asemenea neliniare, vom trece la rezolvarea problemei ce ne-am propus-o, adică la optimizarea proiectării motoarelor de inducție polifazate cu rotor în scurtcircuit, în dublă colivie.

Motorul de inducție cu colivie simplă, în sprijă cu bare finalte, apare ca un caz particular al motorului cu rotor în dublă colivie și în consecință optimizarea proiectării motorului cu dublă colivie rezolvă implicit și optimizarea proiectării celui cu colivia simplă.

Așa cum s-a arătat anterior, optimizarea proiectării unui motor de inducție poate fi soluționată eficient și elegant cu ajutorul metodelor de programare neliniară.

După cum se cunoaște o problemă generală de programare neliniară poate fi formulată, în limbaj matematic, după cum urmează:

Să se determine vectorul:

$X = \{x_i\}$, ($i = 1, 2, \dots, n$) astfel încît $F(X)$ să devină minimă sau maximă /în cazul nostru minimă/ și în același timp $g_j(X) \geq 0$ ($j = 1, 2, \dots, m$); $X \geq 0$.

Funcția $F(X)$ este funcția obiectiv, în cazul nostru funcția de cost; $g_j(X)$ sint funcțiile de constrințe sau restricțiile iar vectorul X conține variabilele independente ce vor trebui determinate ca soluții ale problemei.

O etapă deosebit de importantă în procesul optimizării proiectării motorului este alegerea variabilelor independente. Proiectantul care sintetizează un motor nou are de luat în calcul cca 50 de parametrii.

Numărul mare de parametrii care caracterizează mașina asincronă, pot fi împărțiți în două categorii:

- (a). de bază, care sunt variabilele independente cum ar fi unele dimensiuni geometrice și solicitări electromagnetice, acestea influențează sensibil performanțele și costul mașinii;
- (b). secundari, cum sunt: coeficienții de umplere, numărul de crestături, deschiderea crestăturii, înălțimea penelui; acestia având o influență mică asupra performanțelor mașinii și asupra costului, pot fi considerați constanti pentru un motor dat sau exprimati implicit în termenii altor variabile.

Observații: Variabilele independente le vom nota în programul de optimizare cu y_i și nu cu x_i , cum se notează frecvent în literatura de specialitate, pentru a nu fi confundate cu reactanțele mașinii notate cu X .

2.1. Alegerea variabilelor independente

Am ales drept variabile independente următoarele mărimi:

1. diametrul interior al statorului, $(D_{si}) - y_1$ (mm);
2. lungimea miezului feromagnetic, $(L_p) - y_2$ (mm);
3. înălțimea totală a crestăturii statorice, (h_{st}) y_3 (mm);
4. secțiunea netă a crestăturii statorice, $(S_{1\ net})$ y_4 (mm^2);
5. înălțimea jugului statoric (h_{lj}) y_5 (mm);
6. secțiunea barei de pornire, (S_{brp}) y_6 (mm^2);
7. secțiunea barei de lucru (S_{brl}) y_7 (mm^2);
8. înălțimea totală a coliviei rotoria (hr) y_8 (mm).

9. reactanța interioară a coliviei, definită
după /97/, $(x_1) = (\gamma)$ $y_9 (\lambda)$

10. numărul de conductori activi din creștă-
tura statorică, $(N_c) =$ $y_{10} (f.d.)$

Cu toate că în (9), (9'), (52), (89) se preferă ca variabile independente unele mărimi cum sunt: lățimea creștăturii statorice (medie), lățimea creștăturii rotorice (medie), inducția în întrefier, lățimea inelului de scurtcircuitare, înălțimea inelului de scurtcircuitare, mărimea întrefierului, înălțimea jugului rotoric, densitățile de curent din înfășurarea statorică și rotorică și diametrul exterior al statorului, combinate cu unele din cele 10 alese în prezența lucrării, autorii operind cu 4 pînă la 11 variabile, nu le-am reținut pe cele menționate în bibliografia citată din considerentele expuse în cele ce urmează.

Din analiza modului cum variază aceste mărimi în decursul procesului de optimizare și avînd în vedere ponderea lor în funcția de cost și în expresiile restricțiilor, se desprind următoarele concluzii: înălțimea jugului rotor (h_{2j}) variază puțin și nu are pondere; în consecință este un parametru secundar și nu se justifică includerea lui în categoria variabilelor independente; dimensiunile inelului de scurtcircuitare (a_i, b_i) au pondere mică în expresiile restricțiilor, variază puțin iar în ce privește participarea lor în funcția de cost ele pot fi introduse prin intermediul dimensiunilor creștăturii rotorice cunoscind faptul că există o relație între aceste mărimi, așa că nu vor fi introduse în categoria variabilelor independente; mărimea întrefierului (δ) variază puțin, nu participă la funcția de cost și după cum se știe proiectantul alege inițial dimensiunea minimă admisă din punct de vedere mecanic, așa că nu-l vom considera variabilă independentă în programul de optimizare, el fiind deja stabilit în proiectul inițial al motorului (PRIMO); înălțimea jugului statoric (h_{1j}) , deși variază puțin, o vom menține ca variabilă independentă întrucât intervine direct în funcția de cost; densitățile de curent (j_1, j_2) variază în limite restrînse, se aleg deja în (PRIMO) spre limita superioară, nu intervin

direct în funcția de cost și nu au pondere în expresiile funcțiilor de constrințere așa că nu le vom considera variabile independente; diametrul exterior al statorului (D_{se}) rezultă implicit din moment ce avem diametrul interior, înălțimea crestăturii și înălțimea jugului statoric așa că nu intră ca variabilă independentă. Celelalte mărimi care n-au fost comentate vor participa în program ca variabile independente cu următoarele precizări.

In locul lățimii medii a crestăturii statorului se va considera variabilă independentă secțiunea netă a acesteia justificat prin faptul că la motoarele analizate crestătura are, de regulă, formă trapezoidală cu racordări din care cauză b_{1m} ar avea o valoare aproximativă. La rotor în locul lățimii medii a crestăturii b_{2m} , valabilă la motoare cu colivie simplă, la motoare cu rotor în dublă colivie din care derivă primul tip vom introduce două variabile și anume: secțiunea barei de pornire (s_{brp}) și secțiunea barei de lucru (s_{brl}).

2.2. Functia obiectiv F(Y)

La motorul de inducție $F(Y)$ poate să reprezinte volumul, greutatea sau costul motorului.

In lucrare vom defini funcția $F(Y)$ ca reprezentând costul motorului.

Din punctul de vedere al fabricantului costul motorului rezidă în costul materialelor și costurile de producție aferente realizării lui. Pentru consumator (beneficiar) el se compune din prețul de achiziție (care include costurile fabricantului) plus cheltuielile de exploatare.

In definirea funcției obiectiv costul mașinii va include în el următoarele componente:

- costul confecționării miezului magnetic (C_{Fe});
- costul confecționării înfășurării statorului (C_{cu});
- costul confecționării înfășurării rotorului (C_{Al})
- costul confecționării părților constructive (carcasă, scuturi, arbori) (C_c)

Costurile exploatarii nu au fost incluse ca o componentă distinctă deoarece reducerea lor se realizează implicit prin limitarea încălzirii (în sus), a randamentului și a factorului de putere (în jos), așa cum se va vedea în paragraful următor.

In consecință, rezultă următoarea expresie pentru funcția obiectiv (de cost):

$$F(Y) = C_{Fe} + C_{cu+iz} + C_{Al} + C_c \quad (199)$$

(Costurile exploatarii:)

Precizare: Explicitarea relațiilor pentru $F(Y)$ este redată în anexa nr. 9.

Componentele funcției de cost au următoarele expresii:

$$C_{Fe} = (k_1 + k'_1) \cdot [D_{si} + (h_s + h_{lj})]^2 \cdot L_p \quad \text{lei} \quad (200)$$

$$C_{cu+iz} = \frac{\pi}{4} Z_1 (k_2 K_1 S_{1net} + k'_2 N_C^{K_2}) \cdot [(L_p + K_3) + \\ + K_5 (D_{si} + 2h_s)] + k_3 K_7 \Delta iz (h_s + 3 \frac{S_{1net}}{h_s}) L_p \quad \text{lei} \quad (201)$$

$$C_{Al} = K_8 \left[k_4 Z_2 (S_{brp} + S_{brl}) L_p + k_4 K_9 \frac{S_{brl}^2}{L_p} x_1 \right. \\ \left. (D_{si} - h_r) + k_4^2 \frac{\pi}{4} D_{si}^2 L_p \right] \quad \text{lei} \quad (202)$$

$$C_c = K_{10} (k_5 + k'_5) \left\{ \frac{\pi}{4} [D_{si} + 2(h_s + h_{lj})]^2 - \right. \\ \left. - \frac{\pi}{4} D_{si}^2 \right\} L_p \quad \text{lei} \quad (203)$$

Observații: Notațiile introduse sunt cele frecvent utilizate în metodicele de proiectare, în plus mai precizăm că unii coeficienți numerici, precizați în anexa nr. 9, au fost determinați pe bază de măsurători în producția de serie.

Trecind la variabilele curente putem scrie (vezi și anexa nr. 9)

$$c_{Fe} = (k_1 + k'_1) [y_1 + 2(y_3 + y_5)]^2 \cdot y_2 \quad \text{lei} \quad (204)$$

$$c_{cu+iz} = \frac{\sqrt{J}}{4} z_1 (k_2 K_1 y_4 + k'_2 K_2 y_{10}) [(y_2 + K_3) + \\ + K_5 (y_1 + 2y_3)] + k_3 K_7 \Delta_{iz} (y_3 + 3 \frac{y_4}{y_3}) \cdot y_2 \quad \text{lei} \quad (205)$$

$$c_{Al} = K_8 [k_4 z_2 (y_6 + y_7) y_2 + k_4 K_9 \frac{y_7^2}{y_2} y_9 (y_1 - y_8) + \\ + k'_4 \frac{\sqrt{J}}{4} y_1^2 y_2] \quad \text{lei} \quad (206)$$

$$c_c = K_{10} (k_5 + k'_5) \left\{ \frac{\sqrt{J}}{4} [y_1 + 2(y_3 + y_5)]^2 - \frac{\sqrt{J}}{4} y_1^2 \right\} \text{lei} \quad (207)$$

Funcția obiectiv (de cost) va avea în final expresia generală (a se vedea și anexa nr.9) :

$$F(Y) = (k_1 + k'_1) [y_1 + 2(y_3 + y_5)]^2 \cdot y_2 + \frac{\sqrt{J}}{4} z_1 (k_2 K_1 y_4 + \\ + k'_2 K_2 y_{10}) [(y_2 + K_3) + K_5 (y_1 + 2y_3)] + k_3 K_7 \Delta_{iz} \cdot \\ (y_3 + 3 \frac{y_4}{y_3}) y_2 + K_8 [k_4 z_2 (y_6 + y_7) y_2 + k_4 K_9 \frac{y_7^2}{y_2} y_9 \cdot \\ (y_1 - y_8) + k'_4 \frac{\sqrt{J}}{4} y_1^2 y_2] + K_{10} (k_5 + k'_5) \frac{\sqrt{J}}{4} \cdot \\ [(y_1 + 2y_3 + 2y_5)^2 - y_1^2] \quad \text{lei} \quad (208)$$

Observație: Expresiile generale ale constantelor de mai sus precum și a altor constante și pseudoconstante ce intervin în program sunt redate la pag. 183 - 185. Tot aici sunt précisate și valorile numerice ale acelorași constante și pseudoconstante pentru cazul concret - motorul ASID. CT 200/4 18,5 kW, 1500 r/m, cu rotor în dublă colivie - ales ca exemplu la aplicarea metodei elaborate de autor.

2.3. Alegerea restricțiilor și formularea lor matematică

Minimizarea funcției obiectiv (de cost) exprimată conform relației (208) ar conduce la limită, făcind $F(Y) = 0$, dacă nu s-ar avea în vedere a numite restricții, la soluții banale de forma:

$$y_1 = -2y_3 ;$$

$$y_2 = 0;$$

$$y_4 = -\frac{k_2}{k_2} \frac{K_2}{K_1} y_{10};$$

$$y_6 = -y_7;$$

$$y_8 = y_1;$$

$$y_9 = 0.$$

Soluții care nu au sens fizic și nu rezolvă de fapt problema.

Prin urmare analiza funcției de cost și minimizarea ei se face concomitent cu respectarea anumitor valori impuse pentru caracteristicile de ieșire ale mașinii de inducție cum sunt: cuplul de pornire, cuplul maxim, curentul de pornire, randamentul, factorul de putere, încălzirea, etc.

Pe lîngă restricțiile de tipul celor de mai sus se introduce criteriul fizic de realizare care prevede ca toate variabilele să fie mai mari decât zero ($x_i > 0$).

Analizînd criteriile de alegere a unor parametrii ai mașinii drept restricții de către diferiți autori (9), (9'), (52), (89), și avînd în vedere prevederile standardelor noastre precum și normele internaționale am prevăzut ca funcții de constrîngere (restricții) următorii parametrii ai mașinii:

1. raportul cuplului de pornire către cuplul nominal, respectiv $M_p = m_p M_N$;
2. raportul cuplului maxim către cuplul nominal, respectiv $M_M = m_M M_N$.
3. raportul curentului de pornire către curentul nominal, respectiv $I_p = i_p I_{1N}$ i_p
4. randamentul la sarcina nominală, η_N
5. factorul de putere nominal $\cos \varphi_N$
6. alunecarea la sarcina nominală, s_N
7. încălzirea la sarcina nominală, θ_N
8. raportul dintre reactanța inductivă și rezistența ohmică a dublei colivii la regim nominal, $\frac{x_{ic}}{R_{ic}}$

In continuare vom scrie expresiile parametrilor alesi drept restricții pornind de la schema echivalentă a mașinii de inducție cu circuitul de magnetizare scos la borne (schema în L), respectiv schema echivalentă a rotorului cu dublă colivie după (95), iar pentru încălzire o schemă termică echivalentă, simplificată, după (124).

Observații: Explicitarea parametrilor fizici se dă în anexa 10.

1. Cuplul de pornire

$$M_p = \frac{m_1 U_{lf}^2}{2 \pi n_1} \cdot \frac{R_{2r}}{\left[R_{120^\circ} + (1 + Z_1) R_{2r} \right]^2 + \left[X_{1s} + (1 + Z_1) X_{2s} \right]^2} \text{ (Nm)} \quad (209)$$

unde: R_{2r} - rezistență ohmică a dublei colivii, ținând seama de refularea curentului, raportată la stator;
 X_{1s} - reactanță statorică ținând seama de saturare căilor de dispersie;
 X_{2s} - reactanță coliviei, ținând seama de saturare și refulare, raportată la stator;
 m_1 - numărul de faze a infășurărilor statorice ($m_1=3$);
 n_1 - turăția sincronă ($n_1=25$ rot/sec în cazul aplicației ns).

2. Cuplul maxim

$$M_m = \frac{m_1 U_{lf}^2}{2(1 + Z_1) 2 \pi n_1 (R_{175^\circ} + Z_\infty)} = \frac{m_1 U_{lf}^2}{4 \pi (1 + Z_1) n_1} \cdot \frac{1}{R_{175^\circ} + \sqrt{R_{175^\circ}^2 + \left[X_1 + (1 + Z_1) X_2 \right]^2}} \text{ (Nm)} \quad (210)$$

3. Curentul de pornire

$$I_{1p} = (1 + Z_2) I_{2p} = \frac{U_{lf} (1 + Z_2)}{Z_{kp}} = \frac{U_{lf} (1 + Z_2)}{\left\{ \left[R_{120^\circ} + (1 + Z_1) R_{2r} \right]^2 + \left[X_{1s} + (1 + Z_1) X_{2s} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (\text{A}) \quad (211)$$

4. Randamentul

4. Rendimentul

$$N = \frac{P_N}{P_N + p_{tot}} \quad (\text{f.d.}) \quad (212)$$

5. Factorul de putere

$$\cos \varphi_N = \frac{I_{oa} + I'_{2a}}{I_{lf}} \quad (\text{f.d.}) \quad (213)$$

6. Alunecarea

$$S_N = \frac{P_{2Al}}{P_N + P_{2Al} + p_{m+v}} \quad (\text{f.d.}) \quad (214)$$

7. Încălzirea

$$\theta_{Cu} = \theta_{Cu-Fe} + \theta_{ca} + \frac{1}{2} \theta_a \quad (^{\circ}\text{C}) \quad (215)$$

θ_{Cu-Fe} - încălzirea cuprului față de fier

θ_{ca} - încălzirea carcasei față de aer

θ_a - încălzirea aerului de răcire
față de ambiant

8. Raportul dintre reactanta inductivă și rezistența ohmică a dublei colivii, în regim nominal

$$\frac{X_{ic}}{R_{ic}} = \frac{r_p x_e}{(r_p + r_e) r_e} \quad (\text{f.d.}) \quad (216)$$

Observatie: Explicitarea parametrilor fizici ce intervin în relațiile 209 și 216 se dă la pag. 131-151 și în anexa nr.10.

Să notăm cu b_j , ($j=1, 2, \dots, 9$) valorile impuse celor nouă parametrii, adică:

$$b_1 = m_p \cdot M_N$$

$$b_2 = m_M \cdot M_N$$

$$b_3 = i_p \cdot I_{LN}$$

$$b_4 = \eta_N$$

$$b_5 = \cos \varphi_N$$

$$b_6 = s_N$$

$$b_7 = \theta_{adm}$$

$$b_8 = \left(\frac{x_{ic}}{R_{ic}} \right)_{max}$$

$$b_9 = \left(\frac{x_{ic}}{x_{ic}} \right)_{min} \quad (217)$$

$$M_N = \frac{P_N}{\frac{\omega}{p}} = \frac{P_N}{2 \pi n_1} \quad (Nm) \quad (218)$$

P_N - putere nominală în W

n_1 - turată sincronă în rot/sec.

Cu acestea, expresiile funcțiilor de restricție devin:

$$g_1(Y) = \frac{m_1 U_{lf}^2}{2 \pi n_1} \cdot \frac{R'_{2r}}{[R_{120} + (1+z_1) R'_{2r}]^2 + [x_{1s} + (1+z_1) x'_{2s}]^2} - b_1 \gg 0 \quad (219)$$

$$g_2(Y) = \frac{m_1 U_{lf}^2}{4 \pi (1+z_1) n_1} \cdot \frac{1}{R_{175} + \sqrt{R_{175}^2 + [x_1 + (1+z_1) x'_2]^2}} - b_2 \gg 0 \quad (220)$$

$$g_3(Y) = \frac{U_{lf} (1+z_1)}{\left\{ [R_{120} + (1+z_1) R'_{2r}]^2 + [x_{1s} + (1+z_1) x'_{2s}]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}} - b_3 \gg 0 \quad (221)$$

$$g_4(Y) = \frac{P_N}{P_N + P_{tot}} - b_4 \gg 0 \quad (222)$$

$$g_5(Y) = \frac{I_{oa} + I'_{2a}}{I_{lf}} - b_5 \gg 0 \quad (223)$$

$$g_6(Y) = b_6 - \frac{p_{2Al}}{p_N + p_{2Al} + p_{m+v}} \geq 0 \quad (224)$$

$$g_7(Y) = b_7 - \theta_{Cu-Fe} + \theta_{ca} + \frac{1}{2} \theta_a \geq 0 \quad (225)$$

$$g_8(Y) = b_8 - \frac{r_p x_1}{(r_p + r_1)r_1} \geq 0 \quad (226)$$

$$g_9(Y) = \frac{r_p x_1}{r_1(r_p + r_1)} - b_9 \geq 0 \quad (227)$$

In tabelul de mai jos redăm cîmpul de toleranță a parametrilor b_j , pentru motoare de inducție trifazate și în speță pentru motorul de 18,5/1500 ales pentru optimizare.

TABEL Nr.3

	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
Valori nominale (V_N)	$m_p M_N$	$m_M M_N$	$i_p I_N$	η_N	$\cos \varphi_N$
Valori pentru cazul ales (V_{Na})	$2,5M_N$	$2 M_N$	$5,5I_N$	0,89	0,84
Valori limită	$0,85V_{Na}$	$0,9V_{Na}$	$1,2V_{Na}$	$\eta_N - 0,15(1-\eta_N) \cos \varphi_N - \frac{1}{6}(1-\cos \varphi_N)$	
V	b_6	b_7	b_8	b_9	
Valori nominale (V_N)	s_N	θ_{adm}	$(\frac{X_{ic}}{R_{ic}})_{max} =$ $= f(P_N)$	$(\frac{X_{ic}}{R_{ic}})_{min} =$ $= f(P_N)$	
Valori pentru cazul ales	0,03	80°C	6	3	
Valori limite	$(0,8-1,2)s_N$	75	6	3	

In cele ce urmează vom prezenta relații de calcul pentru parametrii fizici ai mașinii, parametrii ce intră în expresiile funcțiilor restricții, funcție de variabilele independente precum și programul pentru determinarea curentului de magnetizare (MAGNET) respectiva subprogram pentru geometria transversală a mașinii.

2.4. Exprimarea parametrilor fizici ai mașinii în funcție de variabilele independente (y).

Obs: Deducerea expresiilor $f(y)$ este redată succint în anexa nr. 10.

$$R_{120^\circ} = \rho_{Cu20^\circ} \frac{2(L_p + L_{ifm})w_1}{a_1 S_{\text{cond. activ}}} \quad [\Omega] \quad (228)$$

în variabilele curente

$$R_{120^\circ} = K_{12} \frac{[(y_2 + K_3) + K_5(y_1 + 2y_3)]y_{10}^2}{y_4} \quad [\Omega] \quad (229)$$

$$R_{175^\circ} = 1,24 R_{120^\circ} \quad [\Omega] \quad (230)$$

$$X_1 = 4\pi\mu_0 f_1 \frac{w_1^2}{pq_1} \cdot L_p (\lambda_{1c} + \lambda_{1d} + \lambda_{1f}) \quad [\Omega] \quad (231)$$

în variabilele curente

$$X_1 = K_{16} y_2 y_{10}^2 \left\{ K_{13} \left[\frac{h_{31}}{b_{51}} + \frac{2h_{32}}{b_{51} + b_{52}} + \frac{(y_3 - h_{31} - h_{32})^2}{3,6y_4} \right] + K_{14} y_1 + K_{15} \frac{y_1}{y_2} \right\} \quad [\Omega] \quad (232)$$

$$R'_{275^\circ} = K \left(\rho_{Al175^\circ} \frac{L_p}{S_{br}} + \rho_{Al175^\circ} \frac{\pi D_L}{Z_2 S_i} \cdot \frac{1}{2 \sin^2 \frac{\pi p}{Z_2}} \right) \quad [\Omega] \quad (233)$$

și

$$R'_{275^\circ} = K_{17} \rho_{Al175^\circ} y_{10}^2 \left(\frac{y_2}{y_6 + y_7} + K_{19} \frac{y_1 - y_8}{y_6 + y_7} \right) \quad [\Omega] \quad (234)$$

$$X'_2 = 2\pi f_1 \mu_0 L_p K (\lambda_{2c} + \lambda_{2d} + \lambda_{2f}) \quad [\Omega] \quad (235)$$

respectiv

$$X'_2 = K_{17} y_{10}^2 \left[\frac{x_p y_6^2 + 3x_p y_6 y_7 + y_7^2 y_9}{(y_6 + y_7)^2} + K_{20} y_2 \frac{h_{41}}{b_{71}} + K_{20} K_{21} y_1 y_2 + K_{20} K_{22} \frac{y_6 + y_7}{y_8} \right] \quad [\Omega] \quad (236)$$

$$X_{15} = 4\pi\mu_0 f_1 \frac{w_1^2}{pq_1} L_p (\lambda_{1cs} + \lambda_{1ds} + \lambda_{1f}) \quad [\Omega] \quad (237)$$

- 139 -

în variabile independente :

$$X_{1S} = K_{16} y_2 y_{10}^2 \left\{ K_{13} \left[\frac{h_{51}}{b_{51}} + \frac{2 h_{52}}{b_{51} + b_{52}} + \frac{(y_3 - h_{51} - h_{52})^2}{3,6 y_4} \right] - \frac{h_{51} + 0,58 h_{52}}{b_{51}} \right. \\ \left. - \frac{c_1}{c_1 + 1,5 b_{51}} + \chi_g K_{14} y_1 + K_{15} \frac{y_1}{y_2} \right\} \quad [\Omega] \quad (238)$$

$$X'_{2S} = K X_{2CS} + 2 \tilde{J} I \mu_0 f_1 L_p K (\chi_g \lambda_{2d} + \lambda_{2f}) \quad [\Omega] \quad (239)$$

respectiv

$$X'_{2S} = K_{17} y_{10}^2 \left[\frac{\rho_{Al20^\circ}^2 y_2^2 y_7^2 y_9}{\rho_{Al20^\circ}^2 y_2^2 (y_6 + y_7)^2 + y_6^2 y_7^2 y_9^2} + k_{20} y_2 \frac{h_{51}}{b_{51}} + \right. \\ \left. + K_{20} K_{21} \chi_g y_1 y_2 + K_{20} K_{22} \frac{y_6 + y_7}{y_8} \right] \quad [\Omega] \quad (240)$$

$$R'_{2r} = K \left[R_{2rb} + \rho_{Al20^\circ} \frac{\tilde{J} I D_i}{Z_2 S_i} \frac{1}{2 \sin^2 \left(\frac{\pi P}{Z_2} \right)} \right] \quad [\Omega] \quad (241)$$

în variabilele curente :

$$R'_{2r} = K_{17} y_{10}^2 \left[\frac{\rho_{Al20^\circ}^3 y_2^3 (y_6 + y_7) + \rho_{Al20^\circ} y_2 y_6 y_7^2 y_9^2}{\rho_{Al20^\circ}^2 y_2^2 (y_6 + y_7)^2 + y_6^2 y_7^2 y_9^2} + \right. \\ \left. + \rho_{Al20^\circ} K_{19} \frac{y_1 - y_8}{y_6 + y_7} \right] \quad [\Omega] \quad (242)$$

$$I_\mu = \dots$$

Observație :

Pentru calculul curentului de magnetizare (I_μ) se va utiliza subprogramul MAGNET de la § 2.4.1.

- 140 -

$$P_{Fe} = P_{ij} + R_d \left[1 + 2 \sqrt{t_1 (k_f - 1)^3} \right] \quad [W] \quad (243)$$

respectiv

$$P_{Fe} = K_{ij} P_{ij} K_{23} \left[\pi (y_1 y_5 + 2 y_3 y_5 + y_5^2) \right] y_2 + \quad [W] \quad (244)$$
$$+ K_{id} P_{id} K_{23} \left[\pi (y_1 + 2 y_3) - K_{24} \frac{y_4}{y_3} \right] \cdot \left[1 - K_{25} \sqrt{y_1} \right] \cdot y_2 y_3$$

Obs: Valorile lui P_{ij} și P_{id} se iau din tabela 4
(anexa nr. 11) $f(B_{ij})$ și respectiv $f(B_{id})$;
 B_{ij} și B_{id} rezultă din subprogramul MAGNET

$$P_{AL} = Z_2 R_{275^\circ} I_{2b}^2 \quad [W] \quad (245)$$

$$P_{AL} = K_{26} y_{10}^2 \left[\frac{y_2}{y_6 + y_7} + K_{19} \frac{y_1 - y_8}{y_6 + y_7} \right] \quad [W] \quad (246)$$

$$P_{Cu_0} = 3 R_{180^\circ} \cdot I_\mu^2 \quad [W] \quad (247)$$

$$P_{supl_{Cu}} \cong 0,5 \frac{P_N}{100} \quad [W] \quad (248)$$

$$P_{m+v} \cong K_{m+v} 2_p \gamma_p^2 \cdot 10^4 \quad [W] \quad (249)$$

respectiv

$$P_{m+v} \cong K_{27} y_1^3 \quad [W] \quad (250)$$

$$I_{00} = \frac{P_{Fe} + P_{Cu_0} + P_{m+v}}{3 U_{if}} \quad [A] \quad (251)$$

$$S_N = \frac{P_{AL}}{P_N + P_{AL} + P_{m+v}} \quad [f.d.] \quad (252)$$

$$R_{KN} = R_{175^\circ} + (1 + \gamma_1) \frac{R'_{275^\circ}}{S_N} \quad [\Omega] \quad (253)$$

$$X_{KN} = X_1 + (1 + Z_1) \cdot X'_2 \quad [\Omega] \quad (254)$$

$$Z_{KN} = \sqrt{R_{KN}^2 + X_{KN}^2} \quad [\Omega] \quad (255)$$

$$I'_2 = K_i \frac{U_{if}}{Z_{KN}} \quad [A] \quad (256)$$

$K_i \Rightarrow$ coeficient determinat experimental

$K_i = 0,8 \div 0,9$ - pentru motoare cu rotor în dublă colivie,
avind $p = 2$ și $P_N = (10 \div 20) \cdot 10^3$ [W]

$$I'_{20} = I'_2 \frac{R_{KN}}{Z_{KN}} = K_i U_{if} \frac{R_{KN}}{Z_{KN}^2} \quad [A] \quad (257)$$

$$I'_{2r} = I'_2 \frac{X_{KN}}{Z_{KN}} = K_i U_{if} \frac{X_{KN}}{Z_{KN}^2} \quad [A] \quad (258)$$

$$I_{ifN} = \sqrt{(I_{oa} + I'_{20})^2 + (I_{\mu} + I'_{2r})^2} \quad [A] \quad (259)$$

$$P_{Cu} = 3 R_{175^\circ} \cdot I_{ifN}^2 \quad [W] \quad (260)$$

$$P_{tot} = P_{Fe} + P_{Cu1} + P_{AL} + P_{m+v} + P_{suplCu} \quad [W] \quad (261)$$

Relații pentru calculul încălzirii

$$\beta_{izs} = \beta_{str} + \beta_{em_1} + \beta_{em_2} + \beta_a \quad [m] \quad (262)$$

în variabilele curente

$$\beta_{izs} = \frac{K_{29} Y_3^2 + K_{30} Y_4 + K_{28} Y_3 \sqrt{Y_4 Y_{10}} + K_{31} Y_3 Y_4}{2 Y_3^2 + K_{1z} Y_4} \quad [m] \quad (263)$$

$$\lambda_{izs} = \frac{\beta_{izs}}{\lambda_{str} + \frac{\beta_{em_1} + \beta_{em_2}}{\lambda_{em}} + \frac{\beta_a}{\lambda_a}} \quad [W/cm] \quad (264)$$

respectiv în variabilele independente

$$\frac{1}{\lambda_{izs}} = 5 \frac{K_{29} Y_3^2 + K_{30} Y_4 + K_{28} Y_3 \sqrt{Y_4 Y_{10}} + K_{31} Y_3 Y_4}{K_{29} Y_3^2 + K_{30} Y_4 + K_{28} Y_3 \sqrt{Y_4 Y_{10}} + K_{32} Y_3 Y_4} \quad [cm/W] \quad (265)$$

$$S_{\text{tcrs}} = Z_1 P_{\text{crs}} L_P \quad [\text{m}^2] \quad (266)$$

$$\text{St}_{\text{tcrs}} \stackrel{\text{și}}{=} Z_1 \left[2y_3 + K_{iz} \frac{y_4}{y_3} \right] y_2 \quad [\text{m}^2] \quad (267)$$

$$R_{izs} = \frac{\beta_{izs}}{\lambda_{izs} \cdot S_{\text{tcrs}}} \quad [\text{t/w}] \quad (268)$$

$$\Theta_{\text{Cu-Fe}} = P_{\text{Cu}} R_{izs} \quad [\text{°C}] \quad (269)$$

$$\alpha_v = \alpha_0 (1 + k_a \cdot \sqrt{v_a}) \quad [\text{f.d.}] \quad (270)$$

$$S_v = k_v \pi [D_{\text{si}} + 2(h_s + h_{ij})] L_P \quad [\text{m}^2] \quad (271)$$

$k_v = 5,36$ - determinat prin măsurători

$$S_v = k_v \pi [y_1 + 2(y_3 + y_5)] y_2 \quad [\text{m}^2] \quad (272)$$

$$S_o = 2 \frac{\pi}{4} [D_{\text{si}} + 2(h_s + h_{ij})]^2 \quad [\text{m}^2] \quad (273)$$

respectiv

$$S_o = \frac{\pi}{2} [y_1 + 2(h_3 + h_5)]^2 \quad [\text{m}^2] \quad (274)$$

$$R_c = \frac{1}{\alpha_o S_o + \alpha_v S_v} \quad [\text{t/w}] \quad (275)$$

$$\Theta_{\text{Ca}} = R_c \cdot P_{\text{tot}} \quad [\text{°C}] \quad (276)$$

$$\Theta_o \cong 10 \quad [\text{°C}] \quad (277)$$

$$\Theta_{\text{Cu}} = \Theta_{\text{Cu-Fe}} + \Theta_{\text{Ca}} + 0,5 \Theta_o \quad [\text{°C}] \quad (278)$$

2.4.1 SUBPROGRAM PENTRU DETERMINAREA
CURENTULUI DE MAGNETIZARE
(MAGNET)

→ SUBPROGRAMUL PENTRU DETERMINAREA DINTELUI
STATORIC

$$t_1 = \frac{\pi \cdot y_1}{z_1}$$

$$b_{z_1} = \frac{\pi (y_1 + y_3)}{z_1} - b_{c1,med.}$$

unde;

$$b_{c1,med} = \frac{1,2 \cdot y_4}{y_3}$$

pentru,

$b_{z_1} < 0,4 \frac{\pi (y_1 + y_3)}{z_1}$ se trece la generarea altor valori

pentru $y_1 \div y_{10}$

$$= \\ t_2 = \frac{\pi y_1}{z_2}$$

=

→ SUBPROGRAM PENTRU DETERMINAREA DINTELUI
ROTORIC.

Dintele rotoric se calculează pe trei zone.

$$d_{bp} = \sqrt{\frac{\pi}{4} \cdot y_6}$$

$$\alpha_1 = y_8 - 0,5 - d_{bp}$$

$$b_{c2(2)} = 0,6 .$$

$$bc_{2(3)} = \frac{y_7 - 0,6 \cdot \alpha_1}{\alpha_1 - 1,8 \left(\frac{y_9 \cdot 10^7}{\pi \cdot y_2} - \frac{\pi}{2} \right)}$$

$$hc_{2(3)} = \frac{y_7 - 0,6 \alpha_1}{bc_{2(3)} - 0,6}$$

$$hc_{2(2)} = \alpha_1 - hc_{2(3)}$$

$$hc_{2(1)} = db_p + 0,5$$

$$bz_{2(1)} = \frac{\pi \cdot (y_1 - hc_{2(1)})}{z_2} - 0,7 db_p$$

$$bz_{2(2)} = \frac{\pi \cdot (y_1 - 2hc_{2(1)} - hc_{2(2)})}{z_2} - bc_{2(2)}$$

$$bz_{2(3)} = \frac{\pi \cdot (y_1 - 2y_8 + hc_{2(3)})}{z_2} - bc_{2(3)}$$

pentru,

$$bz_{3(3)} < \frac{\pi \cdot (y_1 - 2y_8 + hc_{2(3)})}{z_2} \quad \text{se trece la generarea}$$

altor valori $y_1 \div y_{10}$

=

$$\zeta_p = \frac{\pi y_1}{2p}$$

$$\zeta_1 = \frac{1}{0,983 - 0,002(2p)} - 1$$

$$k_s = 1,6 \text{ (initial)}$$

$$\dot{\Phi} = \frac{U_{IF} \frac{1}{1+\zeta_1} \cdot 10^2}{4 \cdot f_B \cdot f \cdot w_1 \cdot f_{tw}}$$

$$B_s = \frac{\dot{\Phi} \cdot 10^4}{\alpha_i \zeta_p \cdot y_2}$$

α_i - din tabel în funcție de k_s .

$$B_{z_1} = \frac{t_1 \cdot B_f \cdot \left(\frac{3 + Z_1}{3} \right)}{k_{Fe} \cdot b_{z_1}}$$

din curba de magnetizare prin interpolare $\rightarrow \alpha_{wz_1}$

$$A_{z_1} = 0,2 \cdot y_3 \cdot \alpha_{wz_1}$$

$$A_f = 1,6 \cdot k_f \cdot f \cdot B_f$$

$$B_{z_2i} = \frac{t_2 - B_f}{k_{Fe} \cdot b_{z_2i}}$$

se calculează pentru cele trei valori ale lui b_{z_2} și se determină din curba de magnetizare amperspirele corespunzătoare.

$$A_{z_2} = \sum_1^3 0,2 \cdot h_{c2(i)} \cdot \alpha_{wz_2(i)}$$

$$k_s' = \frac{A_d + A_{21} + A_{z_2}}{A_f}$$

Dacă pînă la a 30-a ciclare condiția: $|k_s' - k_s| < 0,005 k_s'$ nu e îndeplinită se reia calculul de la $\otimes\otimes$ cu $k_s = \frac{k_s' + k_s}{2}$ între ciclurile 30 ÷ 60.

Condiția de ieșire din ciclu este $|k_s' - k_s| < 0,01 k_s'$

La a 60-a ciclare se abandonează varianta deoarece k_s nu converge, și se trece la generarea altor valori $y_1 \div y_{10}$.

Obs: pentru fiecare nou k_s , α_i și f_B se extrag din tabel prin interpolare

$$B_{j_1} = \frac{\Phi (1 + Z_1) \cdot 10^4}{2 \cdot y_5 k_{Fe} \cdot y_2}$$

pentru: $B_{j1} > 1$ și $2p = 2$, B_{j1} se corectează numai pentru calculul α_{wj1} și β_{j1}

$$B_{j1 \text{ corectat}} = (B_{j1} - 1) \left(\frac{1}{P_n + 2} + 0,5 \right) + 1$$

- se determină α_{wj1} din curba de magnetizare

β_j se determină cu relațiile:

- pentru :

$$B_j \leq 1 \quad \beta_j = \sqrt{\frac{2,6 - B_j}{4,8}}$$

$$1 < B_j \leq 1,7 \quad \beta_j = 0,57 - 0,42(B_j - 1)$$

$$1,7 < B_j \leq 1,9 \quad \beta_j = \sqrt{\frac{2,85 - B_j}{15}}$$

$$B_j > 1,9 \quad \beta_j = 0,25165$$

$$\Rightarrow A_{j1} = 0,1 \cdot \beta_{j1} \cdot \alpha_{wj1} \cdot L_{j1}$$

$$\text{unde: } L_{j1} = \frac{\pi(y_1 + 2y_3 - y_5)}{2p} + y_5$$

$$B_{j2} = \frac{\Phi \cdot 10^4}{2 \cdot h_{j2} \cdot k_{Fe} \cdot y_2} \quad ; \quad h_{j2} = \frac{y_1 - (2y_8 + \frac{5}{6}d_{ri})}{2} ; d_{ri} = 60 \text{ mm}$$

se determină α_{wj2} și β_{j2}

$$A_{j2} = 0,1 \cdot \beta_{j2} \cdot \alpha_{wj2} \cdot L_{j2}$$

$$\text{unde } L_{j2} = \frac{\pi(h_{j2} + \frac{5}{6}d_{ri})}{2p} + h_{j2}$$

$$A_{tot} = A_\delta + A_{z1} + A_{z2} + A_{j1} + A_{j2}$$

$$I_\mu = \frac{2p + A_{tot}}{5,4 \cdot w_1 \cdot f_{kw}}$$

$$x_1 = 0,0284 \cdot f_B \cdot \frac{f}{100} \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{y_2}{2p \cdot q} (\lambda_{c_1} + \lambda_{d_1} + \lambda_{f_1})$$

$$\zeta_{1ex} = \frac{I_\mu \cdot x_1}{U_{lf} - I_\mu x_1}$$

Se verifică ca $|\zeta_1 - \zeta_{1ex}| < 0,1 \zeta_{1ex}$, și dacă nu e îndeplinită, se reia calculul cu $\zeta_1 = 0,5 (\zeta_1 + \zeta_{1ex})$ de la ∞ pînă la a 20-a ciclare după care se trece la o nouă variantă $y_1 \div y_{10}$ deoarece ζ_1 nu converge.

2.4.2. Subrutină pentru determinarea geometriei transversale

STATOR

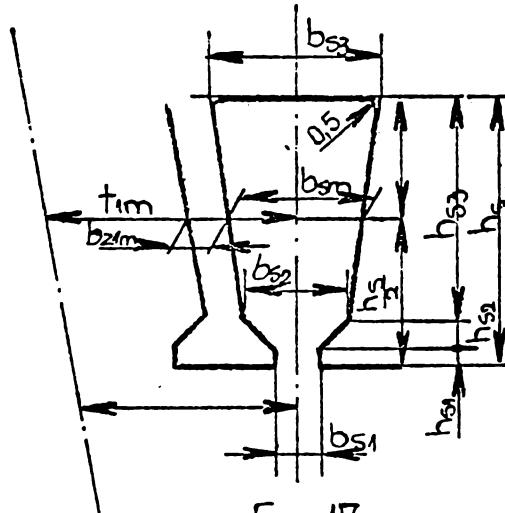


Fig. 17

Obs: Dimensiunile b_{s1} , h_{s1} și h_{s2} se aleg pe considerante tehnologice și de permeanță

În general:

$$b_{s1} = 2,5 d_{ci2}$$

$$h_{s1} = 0,5 b_{s1}$$

$$h_{s2} = 3 h_{s1} = 1,5 b_{s1}$$

$$d_{ci2}^2 = \frac{f_{IU} S_{1net}}{C_p N_c}$$

$$d_{ci2} = \sqrt{\frac{f_{IU}}{C_p}} \cdot \sqrt{\frac{S_{1net}}{N_c}}$$

notind

$$K_{33} = \sqrt{\frac{f_{IU}}{C_p}} \quad \text{și trecind la variabilele curente avem:}$$

$$d_{ci2} = K_{33} y_4^{\frac{1}{2}} y_{10}^{-\frac{1}{2}}$$

$$d_c = K_{33} y_4^{\frac{1}{2}} y_{10}^{-\frac{1}{2}} - \Delta_{izc}$$

respectiv:

$$b_{s1} = 2,5 K_{33} y_4^{\frac{1}{2}} y_{10}^{-\frac{1}{2}}$$

$$h_{s1} = 1,25 K_{33} y_4^{\frac{1}{2}} y_{10}^{-\frac{1}{2}}$$

$$h_{s2} = 3,75 K_{33} y_4^{\frac{1}{2}} y_{10}^{-\frac{1}{2}}$$

$t_{im} = \frac{\pi}{Z_1} (D_{si} + h_s)$; notăm $\frac{\pi}{Z_1} = K_{34}$ și trecem la variabilele curente:

$$t_{im} = K_{34} (y_1 + y_3)$$

$$b_{sm} = k_{iz} \frac{S_{inet}}{h_s - h_{s1} - h_{s2}}$$

$$b_{sm} = K_{iz} \frac{y_4}{y_3 - 5K_{33} y_4^{1/2} y_{10}^{-1/2}}$$

Obs: în cazul nostru: $f_{iu} = 0,758$

$$\begin{aligned} c_p &= 2 \\ d_{iz} &= 0,6197 y_4^{\frac{1}{2}} y_{10}^{-\frac{1}{2}} \\ \Delta_{izc} &= 0,05 \cdot 10^{-3} \quad [m] \end{aligned}$$

$$b_{zim} = t_{im} - b_{sm} = K_{34} (y_1 + y_3) - K_{iz} \frac{y_4}{y_3 - 5K_{33} y_4^{1/2} y_{10}^{-1/2}}$$

Condiție $b_{zim} \geq 0,4 t_{im}$

$$b_{s2} = \frac{\pi (D_{si} + 2h_{s1} + 2h_{s2})}{Z_1} - b_{zim}$$

$$b_{s2} = K_{34} [y_1 + 10K_{33} y_4^{1/2} y_{10}^{-1/2}] - K_{34} (y_1 + y_3) + K_{iz} \frac{y_4}{y_3 - 5K_{33} y_4^{1/2} y_{10}^{-1/2}}$$

$$b_{s2} = K_{34} [10K_{33} y_4^{1/2} y_{10}^{-1/2} - y_3] + K_{iz} \frac{y_4}{y_3 - 5K_{33} y_4^{1/2} y_{10}^{-1/2}}$$

$$S'_1 = k_{iz} S_{inet} - \left(b_{s1} h_{s1} + \frac{b_{s1} + b_{s2}}{2} h_{s2} \right)$$

$$h_{s3} = h_s - h_{s1} - h_{s2}$$

$$h_{s3} = y_3 - 5K_{33} y_4^{1/2} y_{10}^{-1/2}$$

$$b_{s3} = \frac{2S'_1}{h_{s3}} - b_{s2}$$

Condiție

$$K_{34} (y_1 + 2y_3) - b_{s3} \geq b_{zim}$$

Caz contrar $h_s \nearrow$ sau $S_{inet} \searrow$

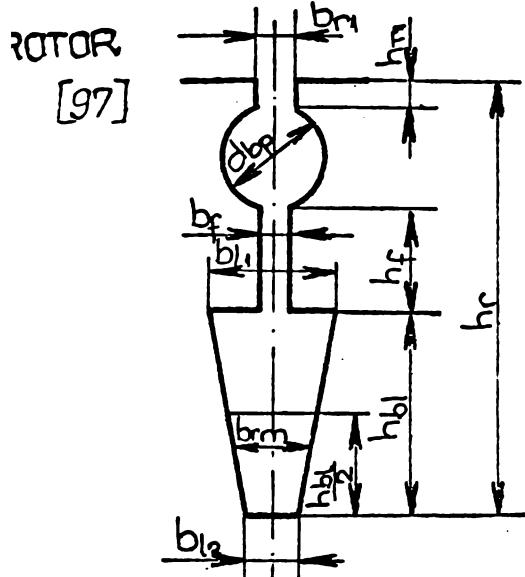


Fig. 18

Avem determinate mărimile:

$$y_6 = S_{brp}$$

$$y_7 = S_{brl}$$

$$y_8 = h_r$$

$$y_9 = x_l$$

Alegem pe considerente tehnologice și de permeanță pe b_{r1} , h_{r1} și b_f

Potrivit scrie:

$$d_{bp} = \sqrt{\frac{4}{\pi}} y_6 = 1,1284 y_6$$

$$\lambda_{2cl} = \frac{y_9}{3,95 \cdot 10^{-4} y_2}$$

$$h_f = h_r - h_{r1} - d_{bp} - h_{bl}$$

notăm

$$h_r - h_{r1} - d_{bp} = \alpha \quad - \text{voloare cunoscută}$$

$$\text{deci } h_f = \alpha - h_{bl}$$

Să determinăm: b_{rm} și h_{bl} .

Potrivit scrie sistemul de ecuații

$$\begin{cases} \lambda_{2cp} + \frac{h_f}{3b_f} + \frac{h_{bl}}{3b_{rm}} = \lambda_{2cl} \\ b_f h_f + b_{rm} h_{bl} = S_{brl} \end{cases}$$

unde $\lambda_{2cp} \Rightarrow$ permeanță crestături de pompare neporcurșată de curent; pentru crestături cu secțiunea circulară $\lambda_{2cp} = 1,57$

Obținem:

$$b_{rm} h_{bl} - b_f h_{bl} = [\alpha - 3b_f (\lambda_{2cl} - \lambda_{2cp})] b_{rm}$$

$$b_{rm} h_{bl} - b_f h_{bl} = S_{brl} - b_f \alpha$$

de unde:

$$b_{rm} = \frac{y_7 - b_f \alpha}{\alpha - 3b_f(\lambda_{2rl} - \lambda_{2cp})}$$

$$h_{bl} = \frac{y_7 - b_f \alpha}{b_{rm} - b_f}$$

și

$$h_f = \alpha - h_{bl}$$

mai rămîne să determinăm pe b_{l1} și b_{l2}

Pentru aceasta scriem :

$$t_{2m} = \frac{\pi}{Z_2} [D_{si} - (2h_r - h_{bl})]$$

notăm :

$$\frac{\pi}{Z_2} = K_{35}$$

și

$$t'_{2m} = K_{35} [y_1 - (2y_8 - h_{bl})]$$

respectiv :

$$b_{z2m} = t_{2m} - b_{rm}$$

condiție : $b_{z2m} \geq 0,4 t_{2m}$

$$b_{l2} = \frac{\pi}{Z_2} (D_{si} - 2h_r) - b_{z2m}$$

sau

$$b_{l2} = K_{35} (y_1 - 2y_8) - b_{z2m}$$

și

$$b_{l1} = 2b_{rm} - b_{l2}$$

sau

$$b_{l1} = \frac{\pi}{Z_2} [D_{si} - 2(h_r - h_{bl})] - b_{z2m}$$

respectiv

$$b_{l1} = K_{35} [y_1 - 2(y_8 - h_{bl})] - b_{z2m}$$

%

CAP.F. - PROGRAMUL DE OPTIMIZARE PROPRIU-ZIS

1. Studiul și alegerea metodelor de optimizare

1.1. Formularea generală a problemei de optimizare
în programarea matematică (sumar din Cap. D)

Fiind dată o funcție $F(X)$ în care $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ problema optimizării (și vom înțelege prin optimizarea aflarea minimului) în programarea matematică constă în determinarea vectorului X în aşa fel ca:

$$F(X) \rightarrow \text{minim}, \quad (279)$$

în prezența restricțiilor

$$g_j(X) \left\{ \geq ; = ; \leq \right\}^0, \quad (j=1,2,\dots,m) \quad (280)$$

Dacă atât funcția obiectiv $F(X)$ cât și relațiile de restricții $g_j(X)$, $j = 1, 2, \dots, m$, sunt liniare în raport cu variabilele x_i , $i = 1, 2, \dots, n$, modelul matematic definit de relațiile (279) și (280) constituie o problemă de programare liniară. În toate celelalte cazuri acest model matematic conduce la o problemă de programare neliniară.

Imaginând o reprezentare în spațiul cu n dimensiuni, o primă situație posibilă corespunde situației în care relațiile de restricții nu au nici o influență asupra localizării minimului. Presupunând că $F(X)$ are derivate continue, minimul va fi caracterizat de un punct interior domeniului admisibil pentru care sunt îndeplinite condițiile cunoscute.

$$\nabla F(X) = 0;$$

$$J = \left(\frac{\partial^2 F(X)}{\partial x_i \partial x_j} \right) \text{ pozitiv def.} \quad (281)$$

O a doua situație posibilă corespunde situației în care minimul se află într-un punct, pentru care $F(X) \neq 0$, dar, cel puțin una din restricții, îndeplinește condiția $g_j(X) = 0$. Considerind în acest de al doilea caz că atât $F(X)$, cât și $g_j(X)$ au derivate continue și presupunind în plus în (280) relații de forma \leq , rezultă condiția de minim.

$$\nabla F(X) = \lambda \nabla g_j(X), \quad \lambda < 0, \quad (282)$$

unde λ este un scalar. Această condiție impune conturelor $F(X) = \text{constant}$ să fie tangente la conturele $g_j(X) = \text{constant}$, precum și necesitatea ca $F(X)$ și $g_j(X)$ să ia valori crescătoare în aceeași direcție. De mentionat, că această condiție nu este întotdeauna suficientă pentru determinarea unui minim al funcției obiectiv [25].

Un algoritm care să rezolve orice formă de problemă de programare neliniară, formulată pentru cazul general prin relațiile (279) și (280) nu a fost încă stabilit. În schimb, au fost puse la punct o serie de metode, fiecare din ele recomandată după forma modelului matematic al funcției obiectiv $F(X)$ și al relațiilor de restricții $g_j(X)$, $j = 1, 2, \dots, m$. Aceste metode se pot clasifica în două categorii:

- metode directe pentru optimizarea problemelor de programare neliniară cu restricții;
- metode indirecte prin care optimizarea problemei neliniare cu restricții este transformată într-o problemă de programare fără restricții.

1.2. Stabilirea algoritmilor și justificarea alegerii lor

Modelul matematic supus optimizării exprimă funcția pretului de cost al unei mașini asincrone în prezența unor restricții explicite neliniare și a unei a doua categorii de restricții legate de domeniul de variație admis al variabilelor independente. Modelul matematic prezentat în Cap.E. este complex, în special calculul relațiilor de restricții necesitând un volum mare de operații preliminare.

In aceste conditii date, o primă îngădare în alegerea unui algoritm rezultă din dificultatea calculului practic al derivatelor parțiale ale funcției obiectiv. Această dificultate ar putea fi depășită prin calculul numeric al derivatelor, dar este știut din analiza numerică că algoritmii de derivare numerică pot conduce la instabilitate. Chiar dacă acest calcul al derivatelor ar fi posibil, el ar necesita un subprogram foarte lung al funcției obiectiv în care sunt exprimate și derivatele, subprogram a cărui parcursere în mod repetat în procesul de optimizare va mări apreciabil timpul de calcul. Un al doilea obiectiv care a stat la baza alegerii celor mai buni algoritmi îl constituie elementul de eficiență, înțelegind că eficiența în acest caz are două componente:

- timpul total de calcul pentru determinarea optimului;
- precizia cu care acest optim este aflat.

Datorită naturii fizice a problemei modelate s-a presupus initial, fapt confirmat ulterior din analiza rezultatelor, că funcția obiectiv nu are un singur minim, ci un număr relativ mare de minime locale și că aceste minime nu se află în interiorul zonei de căutare, ci în anumite puncte de întrețiere a hipersuprafeteelor de nivel cu hipersuprafețele restricțiilor. În consecință, s-a pus problema aflării celui mai probabil minim global, adică, a găsirii celui mai mic minim din minimile locale determinante.

Pe baza argumentelor mai sus menționate, cel mai bun algoritm care ar trebui ales, necesită următoarele calități:

- să nu solicite calculul derivatelor;
- să determine minimul global în condițiile severe în care aceste minime nu se află în interiorul zonei de căutare, ci la o extremitate a domeniilor;
- să conducă la aflarea minimului cu cea mai bună acurateță;
- să aibă o bună convergență, ceea ce implică o utilizare minimă de timp a calculatorului.

Desigur toate aceste condiții nu pot fi găsite la unul și același algoritm, în consecință s-a apelat la:

1.2.1. Algoritmi cu căutare aleatoare, care tind către cel mai probabil minim global al funcției obiectiv. În acest scop s-a întocmit un program bazat pe un algoritm simplu aleator și un al doilea program bazat pe algoritmul complex al lui Box, special dezvoltat pentru probleme de programare neliniară cu restricții. Dezavantajul principal al algoritmilor cu căutare aleatoare, îl constituie timpul mare de calcul necesitat pentru aflarea soluției cu o anumită precizie încadrată în limite acceptabile. Deoarece acest timp de calcul nu întotdeauna poate fi admis, rularea programelor de tip aleator a fost oprită după un timp de calcul predeterminat, urmând ca cea mai bună soluție obținută în acest interval să fie utilizată ca punct de plecare în cea de a doua categorie de algoritmi.

1.2.2. Algoritmul metodei SUMT, făcînd parte din categoria metodelor indirecte, care în urma transformării funcției obiectiv, utilizează un procedeu de optimizare repetată pentru funcții fără restricții. În cadrul metodei SUMT s-a pus problema alegerii algoritmului de minimizare fără restricții. Toate considerențele anterioare au condus la algoritmul lui Powell, (a se vedea și Cap. D), din următoarele două avantaje esențiale:

- are o convergență pătratică, deci este mai rapid și mai precis decît algoritmii cu convergență liniară (Hooke și Jeeves, Rosenbrok etc.);
- nu necesită calculul derivatelor partiiale.

Dezavantajul acestui algoritm, ca de fapt al majorității algoritmilor de optimizare continuă, îl constituie faptul că procedura conduce la un minim local. În consecință, minimul aflat în cazul unei funcții obiectiv complicate, similar celei studiate, nu poate garanta că reprezintă un minim global. Deoarece în prezență lucrare s-a pus problema aflării minimului global, s-a trecut la repetarea căutării pentru puncte diferite de start admisibile. În strategia adoptată, aceste puncte inițiale sunt furnizate de programele întocmite pentru metodele aleatoare, avînd în acest fel cea mai mare posibilitate ca cel mai mic minim determinat să fie și minimul global.

1.2.1. Metoda de căutare aleatoare

Metoda aleatoare utilizată se bazează pe un algoritm relativ simplu. Se generează un set de numere aleatoare normate în funcție de limitele admise pentru variația fiecăreia dintre variabilele independente. Cu valorile astfel alese se verifică dacă cel puțin una din restricții nu a fost încălcată. Dacă acest lucru a avut loc, se abandonează setul de valori al variabilelor independente și se trece la generarea după același procedeu a unui nou set de valori. Dacă în schimb, nici una din restricții nu a fost încălcată, se calculează valoarea funcției pentru acest set de valori al variabilelor independente. În continuare, această valoare a funcției este comparată cu cea mai mică valoare a funcției calculată într-una din iterările anterioare și dacă valoarea sa este mai mică decât aceasta, noua valoare a funcției este reținută pentru comparațiile viitoare. După un număr prestatibil de iterări domeniul de căutare se restrînge în jurul celei mai mici valori a funcției, acest procedeu continuând pînă domeniul de căutare devine mai mic decât o limită dată sau pînă se depășește un număr maxim admis de apeluri ale funcției.

Metoda de căutare aleatoare să cum este descrisă în literatură, a fost modificată, pentru a mări eficiența algoritmului în cadrul problemei de optimizare studiată în lucrare. Mai precis, metoda inițială presupune aflarea unui minim în interiorul zonei admisibile de căutare, urmînd ca fiecare nou set de numere aleatoare generate să conducă la calculul valorilor funcției obiectiv, restrîngînd domeniul de căutare în ambele sensuri pe fiecare coordonată, în jurul punctului de minim aflat pentru setul de numere aleatoare anterior generate.

În cazul special al problemei noastre, minimul nu se află în interiorul zonei de căutare ci la o margine a domeniului determinat de intersecția hipersuprafeteelor de nivel cu ale restricțiilor. În aceste condiții, limitarea în ambele sensuri a domeniului de căutare ar conduce la depărtarea de punctul de minim. Pentru a evita acest neajuns al algoritmului clasic aleator, s-a introdus o nouă tehnică de modificare a domeniului, particular valabil numai categoriei de probleme în care avem cunoștiințe legate de zona de frontiere în care se plasează minimul. Identificînd această zonă de frontieră, s-a trecut la modificarea algoritmului în sensul micșorării domeniului în direcția fiecărei

variabile numai într-un singur sens și anume în sensul în care valoarea funcției obiectiv crește. Prin această tehnică s-a putut obține după un timp de calcul identic (se precizează că s-a rulat programul ALEATOR pe un timp de 40 minute) un minim calitativ mai bun, deci cu o valoare a funcției obiectiv mai mică. Îmbunătățirea adusă algoritmului clasic aleator, în cazul problemelor speciale cu restricții de tipul celei studiate reprezintă o contribuție în ce privește această categorie de algoritmi.

1.2.1.1. Metoda Complex (a se vedea și Cap.D)

Algoritmul metodei Complex stabilit de I.M. Box reprezintă o extindere la problemele neliniare a algoritmului Simplex aplicat optimizării funcțiilor obiectiv liniare în prezența restricțiilor liniare. Restricțiile admise de metoda Box pot fi de natură explicită:

$$g_j(x) \{ \geq ; =; \leq \} 0, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (283)$$

sau restricții de margine, pentru oricare din coordonate:

$$a_i \leq x_i \leq b_i; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (284)$$

Box propune următorul algoritm pentru formarea repetată a unui complex de $n_1 > n + 1$ puncte, cea mai recomandată valoare fiind $n_1 = 2n$ puncte:

1. Fiind dat un punct inițial $x_1 = x_{1,1}, x_{1,2}, \dots, x_{1,n}$ în domeniul admisibil, componentele celorlalte puncte ale complexului inițial se formează cu ajutorul relației:

$$x_{ij} = a_i + p_{ij}(a_i - b_i); \quad i = 1, 2, \dots, n \\ j = 1, 2, \dots, n_1 \quad (285)$$

în care p_{ij} sunt numere aleatoare generate în intervalul $[0,1]$. Dacă în acest proces de generare rezultă un punct pentru care cel puțin una din restricții este încălcată, acesta este înlocuit

cu un alt punct aflat la jumătatea distanței dintre el și centroidul punctelor care satisfac toate restricțiile. Această operație de înlocuire poate fi repetată pînă cînd toate restricțiile sunt satisfăcute.

2. După generarea complexului inițial se calculează valoarea funcției în toate punctele sale, alegînd punctul X_k cu cea mai mare valoare a funcției, care este înlocuit cu un nou punct al complexului utilizînd relația:

$$X_h = X_0 + \alpha (X_0 - X_k) \quad (286)$$

unde X_0 este centroidul tuturor celorlalte puncte ale complexului în afară de X_k , iar α este factorul de reflexie, recomandat cu valoarea $\alpha = 1,3$.

3. Se calculează valoarea funcției în punctul X_h . Dacă $F(X_h) > F(X_r)$, unde X_r este punctul cu cea mai mare valoare a funcției, mai puțin punctul X_k eliminat anterior, atunci X_h este înlocuit cu un alt punct la jumătatea distanței dintre el și centroid, repetînd la necesitate operația, pînă cînd condiția $F(X_h) < F(X_r)$ este îndeplinită.

4. Procedeul descris se repetă pînă un anumit criteriu de stop este satisfăcut. Un criteriu recomandat este dat de relația:

$$|R - Q| < EPS \quad (287)$$

unde pentru centroidul considerat R este punctul cu cea mai mare valoare a funcției, Q punctul cu cea mai mică valoare a funcției și EPS termenul de convergență.

1.2.2. Metoda SUMT (SEQUENTIAL UNCONSTRAINED MINIMIZATION TECHNIQUES)

Metoda SUMT face parte din categoria metodelor indirecte de optimizare, utilizînd, în procesul de minimizare, algoritmii cunoscuți de la problemele de programare neliniară fără restricții.

Există mai multe categorii de funcții de penalizare descrise în literatura de specialitate aplicate în funcție de următoarele două criterii:

- natura relațiilor de restricții, care pot lua forma de inegalități sau egalități;
- modalitatea în care se efectuează căutarea minimului, respectiv pornind dintr-un punct interior sau exterior domeniului admisibil.

Dintre acestea, cea care a dat cele mai bune rezultate în practică, care de fapt este în general recunoscută sub numele de metoda SUMT, formulată inițial de Fiacco și Mc.Cormick, reprezintă un algoritm de punct interior, care pornind de la problema:

$$F(X) \rightarrow \text{minim}$$

în prezența restricțiilor:

$$g_j(X) \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (288)$$

propune minimizarea acesteia după următoarea conversiune.

1. Se definește o nouă funcție, denumită funcție de penalizare:

$$\phi(X, r) = F(X) + r \sum_{j=1}^m \frac{1}{G_j(X)} \quad (290)$$

respectiv:

$$L(X, r) = F(X) - r \sum_{j=1}^m \ln G_j(X) \quad (291)$$

$r > 0$; secvența $\{r_k\}$ este monoton descrescătoare.

Avantajul esențial al metodei SUMT constă în faptul că permite în procesul de minimizare utilizarea algoritmilor bine cunoscute din problemele de optimizare fără restricții.

1.2.2.1. Algoritmul Powell

Principalul avantaj al metodei propusă de Powell, constă în faptul că nu necesită în procesul de optimizare derivele parțiale ale funcției obiectiv, deși algoritmul are o convergență pătratică, similară metodelor de gradient.

Considerind o funcție de n variabile în fiecare iterare a metodei lui Powell, se efectuează o căutare de-a lungul a n direcții s_1, s_2, \dots, s_n liniar independente, de la un punct initial x^0 . După terminarea unei iterării, se reia căutarea pe $n - 1$ direcții avute anterior și o nouă direcție, care reprezintă o direcție mai bună decât cea eliminată. Modul în care la fiecare iterare se alege această nouă direcție asigură ca o funcție pătratică să fie minimizată în exact n iterării.

Algoritmul Powell precum și minimizarea de-a lungul unei direcții au fost descrise în Cap. D.

2. Descrierea și utilizarea programelor

2.1. Programarea metodei ALEATOR

Programarea metodei ALEATOR conține în limbajul FORTRAN trei unități de programe și anume: un program principal și subroutinele RESTR și FUNC.

2.1.1. Programul principal

Programul principal are ca sarcină comunicarea cu utilizatorul prin intermediul mărimilor de intrare și a celor de ieșire, apelarea repetată a subprogramelor RESTR și FUNC în evoluția către minim și determinarea condițiilor de sfîrșit al algoritmului.

Parametrii care se citesc în programul principal au următoarea semnificație:

N - numărul de variabile independente;

NRITER - numărul maxim admis de apeluri ale funcției obiectiv;

ERINT - valoarea minimă a intervalului în care se calculează variabilele independente;

toți acești parametrii sunt trecuți pe o singură cartelă:

A(I) - tablou cu valorile limitelor inferioare admise pentru variabile;

B(I) - tablou cu valorile limitelor superioare admise pentru variabile.

Etapele importante ale programului principal sunt descrise în continuare.

La început, sunt declarate ca reale variabilele folosite în program, care încep cu caracterele M și I, apoi variabilele din COMMON și vectorii din program.

Prin instrucțiunea READ cu eticheta 100 sunt introduse în memorie unul sau mai multe seturi de date inițiale. Prin instrucțiunea WRITE imediat următoare, sunt tipărite datele inițiale, conform instrucțiunii FORMAT cu eticheta 2. În continuare se fac initializările numărătoarelor NRRES (numărul de apelări ale subrutinei RESTR), NRFUNC (numărătorul de apelări ale funcției) NRSCR (numărător care indică după cîte apelări ale funcției se face prima tipărire).

Minimul funcției MINF este inițializat cu o valoare foarte mare (10^{70}).

Ciclul DO cu eticheta finală 4, calculează mărimea intervalelor în care se pot găsi variabilele independente, urmînd ca instrucțiunile de la eticheta 6 la 10 să genereze valori aleatoare pentru variabilele independente.

Se apeleză subrutina RESTR, încrémentînd totodată numărătorul NRRES. Dacă restricțiile nu sunt îndeplinite, se generează alte valori pentru variabilele independente prin întoarcerea la instrucțiunea cu eticheta 6. În caz contrar, este apelată subrutina FUNC. Dacă valoarea funcției obiectiv este mai mică ca minimul anterior, atunci i se atrbuie variabilei MINF nouă valoare a funcției, iar vectorul XMIN reține valorile variabilelor independente corespunzătoare minimului prin ciclul DO cu eticheta finală 16.

Prin instrucțiunea cu eticheta 17 se testează dacă este îndeplinită condiția de tipărire a rezultatelor. Dacă nu este îndeplinită, se generează alt set de valori pentru variabilele independente prin trimiterea la instrucțiunea cu eticheta 6. Tipărirea rezultatelor se face cu instrucțiunea WRITE cu FORMAT-ul cu eticheta 18.

Prin ciclul DO cu eticheta finală 26, se caută valoarea maximă a intervalului în care se găsesc variabilele independente în momentul găsirii minimului, respectiv al funcției obiectiv și se face totodată restrîngerea intervalelor în care se caută variabilele independente.

Pentru valorile vectorului XMIN se apelează subrutina RESTR pentru calculul valorilor intermediare și ale restricțiilor pentru a putea fi tipărite cu instrucțiunea WRITE având formatul cu eticheta 113. Se incrementează apoi cu 20 numărătorul NRSCR.

Programul reia calculul pentru un alt set de date inițiale pînă cînd numărul de apelări ale subroutinei FUNC devine mai mare decît numărul admis, sau intervalul în care se generează valori pentru variabilele independente este maimic ca cel indicat prin ERINT.

2.1.2. Subprogramele metodei ALEATOR

Subrutinele RESTR și FUNC nu prezintă nici un fel de particularități speciale. Prima are rolul de a calcula și verifica restricțiile explicite a căror exprimare este dată de utilizator, iar cea de a doua are rolul de a calcula valoarea funcției obiectiv pentru parametrii transmisi.

2.2. Programarea metodei Complex

Programarea metodei Complex conține în limbajul FORTRAN șase unități de program și anume: un program principal și subrutele COMPLEX, INLOC, INRES, VERIF și FUNC.

2.2.1. Programul principal

Programul principal are ca sarcină comunicarea cu utilizatorul prin intermediul mărimilor de intrare și a celor de ieșire, apelarea repetată a subprogramelor necesare în procesul de generare și evoluție către minim a complexului și determinarea condițiilor de sfîrșit al algoritmului.

Parametrii care se citesc în programul principal au următoarea semnificație:

- ' N - numărul de variabile independente;
- NR - numărul restricțiilor;
- ITER - numărul maxim de iterări admise;
- EPS - valoarea termenului de convergență;
- ALFA - valoarea coeficientului de superreflexie;

In generarea noilor puncte ale complexului, toți acești parametrii sunt trecuți pe o singură cartelă,

- A(I) - tablou cu valorile limitelor inferioare admise pentru variabile;
- B(I) - tablou cu valorile limitelor superioare admise pentru variabile;
- X(I,1) - tablou cu valorile coordonatelor punctului de start aflat în interiorul domeniului admisibil.

Pentru control, după citire, valorile inițiale sunt imprimate. Desfășurarea programului principal începe prin apelul pentru coordonatele punctului initial a subrutinei VERIF în scopul verificării existenței acestui punct în domeniul admisibil. Programul principal continuă numai dacă acest test este trecut cu succes, în caz contrar se imprimă un mesaj și programul se oprește. În continuare, după stabilirea valorilor inițiale pentru o serie de parametrii de control se efectuează, între instrucțiunile 25 și 29, ciclul principal, prin care se apeleză în mod repetat subrutina COMPLEX pentru a genera un punct al complexului, apoi subrutina VERIF pentru a verifica dacă acest punct se află în domeniul admisibil și în caz cînd această condiție nu este îndeplinită, subrutina INRES pentru înlocuirea punctului care a încălcă cel puțin o restricție.

Cînd toate cele $NN = 2 * N$ puncte ale complexului au fost generate se apeleză subrutina FUNC pentru a calcula valoarele funcției în aceste puncte. În program, s-a introdus alături de numărătorul iterării K un al doilea numărător K_1 pentru controlul imprimării. În acest sens, s-a considerat necesar a imprima valorile funcției și coordonatele complexului după 50 de iterări, dar această valoare poate fi schimbată în funcție de necesități. În continuare, se alege cel mai mare și cel mai mic

element al complexului pentru a verifica criteriul de stop. Dacă criteriul de stop este îndeplinit, se imprimă cea mai mică valoare a funcției și coordonatele sale și programul se încheie. În caz contrar, între instrucțiunile 48 și 62 se alege punctul complexului cu cea mai mare valoare și se înlocuiește conform celor specificate în algoritm, urmând a reveni la instrucțiunea cu eticheta 35 pentru o nouă iterație.

OBS. În ultima variantă a programului, dimensiunea complexului este dată de $NN = GAMA * N$, unde N reprezintă numărul variabilelor independente și $GAMA$ un număr întreg care se citește prin datele inițiale:

ex.: pentru $GAMA = 2$ $NN = 20$
 pentru $GAMA = 3$ $NN = 30$; etc.

2.2.2. Subprogramele metodei Complex

Subprogramele menționate au o extindere restrinsă, în consecință vor fi analizate în același paragraf.

Subprogramul COMPLEX generează NN puncte ale complexului, folosind relația (285) unde numerele aleatoare uniform repartizate în intervalul $[0, 1]$, săt generate având la bază relațiile:

$$\begin{aligned}x_0 &= ax_0 - b \left[\frac{ax}{b} \right]; \\y &= \frac{x_0}{b}\end{aligned}\tag{292}$$

unde:

a și b săt constante cu valorile:

$$a = 65539$$

$$b = 21474836,$$

iar:

x_0 inițial recomandat între 4 și 7.

Subprogramul VERIF are rolul de a verifica restricțiile explicite a căror exprimare este dată de utilizator.

Subprogramul INRES are rolul de a înlocui un punct care a încălcăt cel puțin o restricție cu un alt punct aflat la jumătatea distanței dintre el și centroidul punctelor care satisfac toate restricțiile. În acest sens, prin ciclul DO cu eticheta finală 20 se calculează centroidul, iar prin ciclul DO cu eticheta finală 40 se face înlocuirea. De fiecare dată se apelează subrutina VERIF pentru a vedea dacă o restricție este încălcătă, și în caz afirmativ procedura urmează a fi repetată.

Subprogramul INLOC are rolul de a înlocui punctul cu cea mai mare valoare a funcției din complex cu un nou punct conform celor menționate în algoritm.

În fine, subprogramul FUNC are rolul de a calcula valori-le funcției pentru toate punctele complexului pe parcursul unei iterări.

2.3. Programarea metodei SUMT prin algoritmul Powell

Programarea metodei SUMT prin algoritmul Powell conține în limbajul FORTRAN patru unități de program și anume: un program principal și trei subrutine denumite POWELL, MINIM și FUNC.

2.3.1. Programul principal

Programul principal are ca sarcină comunicarea cu utilizatorul prin intermediul mărimilor de intrare și a celor de ieșire, precum și modificarea factorului de penalizare în succesiunea de optimizări cerute de metoda SUMT.

Parametrii care se citesc au semnificația:

- N - numărul de variabile independente;
- ITER - numărul maxim de iterări admis în subprogramul Powell;
- NITER - numărul maxim de iterări admis în căutarea unidimensională;
- PAS - valoarea inițială a pasului;
- R - valoarea inițială a factorului de penalizare;
- EPS - valoarea termenului de convergență;

- - -
- IR - indicator de normalizare a pasului;
NR - un parametru care indică după câte iteratii matricea direcției este adusă la matricea unitate;

Toți acești parametrii sunt trecuți pe o singură cartelă:

- X0(I) - vectorul valorilor inițiale, cu fiecare componentă trecută pe o cartelă separată.

Pentru control, după citire, valorile inițiale sunt imprimate.

In continuare, programul principal apelează pentru punctul inițial subrutina FUNC în scopul de a verifica dacă acesta se află sau nu în domeniul admisibil. Dacă punctul inițial nu este în domeniul admisibil, se imprimă un mesaj și programul se încheie. Dacă testul de punct inițial a fost trecut, se trece la instrucțiunea cu eticheta 40, de unde, pentru valoarea inițială a factorului de penalizare, se apelează subrutina POWELL determinând primul minim. Se imprimă valoarea funcției în punctul de minim și valorile coordonatelor punctului de minim, alături de parametrii IER, M, K, INDEX și R, necesare aprecierii acestui minim, având semnificația:

- IER - un indicator care semnalizează corectitudinea determinării minimului pe o direcție;
M - numărul efectiv de apeluri ale subruteinei FUNC;
K - numărul efectiv de parcurgeri ale algoritmului Powell;
INDEX - indicator care specifică încălcarea sau nu a unei restricții;
R - valoarea factorului de penalizare.

Se trece apoi la o nouă valoare a factorului de penalizare aleasă cu $1/10$ din valoarea anterioară și se repetă procesul de minimizare revenind la instrucțiunea cu eticheta 50.

Ultimul minim obținut, pentru $R < EPS$, tinde conform celor arătate în metoda SUMT (practic este identic) către minimul funcției obiectiv.

Programul principal a fost astfel conceput încât să se poată efectua minimizări pentru diferite puncte initiale din domeniul admisibil.

2.3.2. Subprogramul POWELL

Subprogramul POWELL reprezintă transcrierea în limbajul FORTRAN a primei părți a algoritmului lui Powell descris anterior. Parametrii care fac legătura la subrutină au următoarea semnificație:

- N - numărul de variabile independente față de care este definită funcția;
- X0 - tablou conținând componentele punctului inițial;
- ITER - numărul maxim de iterări admis în algoritm;
- PAS - valoarea inițială a pasului;
- EPS - termenul de eroare față de care se testează convergența;
- XM - tablou conținând în final componentele punctului de minim;
- FM - valoarea minimă a funcției;
- NR - un număr de tip întreg furnizat de utilizator prin care matricea direcției, în ipoteza în care nu există convergență, revine la matricea unitate după NR iterări;
- IR - un indicator necesar subprogramului MINIM pentru normalizarea pasului;
- IER - un indicator care semnalizează corectitudinea rezultatelor furnizate de subprogramul MINIM;
- K - numărător al iterărilor în algoritm Powell;
- INDEX - un indicator furnizat de subrutina FUNC prin care se indică încălcarea unei restricții;
- R - factorul de penalizare, necesitat de subrutina FUNC;

NITER - numărul maxim de iterații admis în căutarea unidimensională de către subprogramul MINIM;

M - numărător al apelurilor subroutinei FUNC.

La începutul subroutinei, după ce se stabilește numărătorul de iterații K la valoarea 1, componentele punctului initial transmise prin X0 sunt trecute în tabloul X1 care va conține pentru fiecare iterație punctul de plecare (x_0^j în algoritm) respectiv în tabloul X necesar pentru apelarea subroutinei MINIM (aceste valori pot fi modificate de subrutină). Se face apoi primul apel pentru a verifica dacă ne aflăm în domeniul admisibil fapt pus în evidență prin valoarea 0 a indicatorului INDEX.

Intre instrucțiunile 13 și 18 se construiește în tabloul Z matricea unitate, fiecare rind al acestuia constituind direcțiile unitare.

Intre instrucțiunile 21 și 31 s-a programat pasul 1 al algoritmului. Aici tabloul unidimensional Z1 conține vectorul direcției.

După pasul 1 al algoritmului, între instrucțiunile 32 și 35 se testează convergența. Dacă testul de convergență s-a îndeplinit, algoritmul se încheie, pe cind dacă acest test nu a reușit, între instrucțiunile 36 și 37 se determină noua direcție (punctul 3 din algoritm) și se minimizează funcția față de această direcție (punctul 4 din algoritm).

Instrucțiunile 41 și 45 calculează pasul pentru noua iterație folosind relația:

$$p_{i+1} = \sqrt{\sum_{j=1}^m (x^i - x^j)^2} \quad (293)$$

Dacă acest pas este prea mic sau diferența dintre două valori successive ale funcției raportată la pas este prea mică, algoritmul se încheie, considerînd minimul atins. Se observă deci că s-au introdus trei criterii de oprire a algoritmului pentru atingerea unui punct considerat minim.

Intre instrucțiunile 48 și 52 se pregătește noua iterație, în ipoteza cînd testele anterioare nu au fost satisfăcute.

Se incrementează apoi numărătorul de iterații și se testează față de valoarea limită. Se testează apoi numărătorul NRI față de NR pentru a vedea dacă este nevoie de a aduce sau nu matricea direcției la matricea unitate.

In final, între instrucțiunile 58 și 63 se efectuează pasul 2 din algoritm (de reținut că efectuarea pasului 2 după pasul 4 nu afectează corectitudinea desfășurării unei iterații) și apoi prin instrucțiunea GØ TØ 35 se revine la o nouă iterație.

2.3.3. Subprogramul MINIM

Subprogramul de tip subrutină MINIM reprezintă transcrierea în limbajul FORTRAN a celei de a doua părți a algoritmului lui Powell legat de minimizarea de-a lungul unei direcții. Parametrii care fac legătura la subrutină au următoarea semnificație:

- N - numărul de variabile independente față de care este definită funcția;
- X - tablou conținând componentele punctului inițial;
- F - valoarea funcției în punctul inițial;
- PAS - valoarea pasului de-a lungul direcției de căutare;
- Z1 - tablou conținând vectorul direcției;
- EPS - termenul de eroare față de care se testează convergența;
- XM - tablou conținând componentele punctului de minim de-a lungul direcției de căutare;
- FM - valoarea funcției în punctul de minim de-a lungul direcției de căutare;
- IER - un indicator care semnalizează corectitudinea rezultatelor furnizate de subrutina MINIM în procesul de minimizare de-a lungul direcției de căutare și anume:
 - IER = 0 minimul aflat este corect;
 - IER = 1 funcția pare a avea valori constante;

IER = 2 nu există convergență în căutarea minimului de-a lungul respectivei direcții;

IER = 3 s-a depășit numărul de iterării admise NITER în căutarea unidimensională;

IER = 4 s-a depășit numărul de iterării admise NITER în cazul violării unei restricții.

IR - indicator de normalizare a pasului:
dacă IR = 0 pasul se normalizează;
dacă IR = 1 pasul nu se normalizează.

INDEX - indicator furnizat de subrutina FUNC prin care se indică încălcarea unei restricții;

R - factorul de penalizare, necesitat de subrutina FUNC;

NITER - numărul maxim de iterării admise în căutarea unidimensională;

N - numărător al apelurilor subrutei FUNC.

In afara de acești parametrii de apel, în subprogram mai sunt utilizate următoarele mărimi principale:

NI - un numărător care numără de câte ori este apelat un nou punct necesar interpolării;

NIT - un numărător care numără încălcările restricțiilor la apelul unui nou punct;

NT - un numărător care numără repetarea operației de interpolare;

KT - un numărător care numără nereusitele, în ipoteza cind după interpolare relația (118) nu a fost satisfăcută;

PASNOR - pasul normalizat;

PASMAX - valoarea maximă admisă a pasului;

G(I) - tabloul cu valorile funcției în procesul de interpolare;

D(I) - tablou cu valorile vectorilor în procesul de interpolare;

Q-o - o variabilă necesitată în procesul de schimb;

Y(I,4) - tablou conținând componentele vectorilor celor 4 puncte necesare în procesul de interpolare.

La începutul subroutinei după initializările numărătoarelor NI și KI, între instrucțiunile 6 și 14 se normalizează sau nu pasul după valoarea parametrilor IR, înțelegind că pasul normalizat p_{nr} este dat de relația:

$$p_{nr} = \frac{|pas|}{\sqrt{z_i^2}} \quad (294)$$

unde $|pas|$ este valoarea absolută a pasului transmis, iar $\sqrt{z_i^2}$ este modulul vectorului direcției.

Fiind cunoscute valoarea funcției în punctul inițial, determinată prin apelul în subroutine POWELL, se transformă această valoare în G(1) considerînd coordonata sa $D(1) = 0$, urmînd ca prin ciclul DO cu eticheta finală 40 să se pregătească coordonatele punctului $X_i + pS_i$ conform punctului 1 din algoritm. Se apelează subroutine FUNC pentru acest punct, determinînd valoarea funcției G(2), la distanța $D(2) = PANSOR$.

Dacă prin acest apel o restricție a fost încălcată, se revine la instrucțiunea cu eticheta 25 prin care se incrementea ză numărătorul NI, se micșorează apoi pasul la jumătate, pregătind apelul subroutinei FUNC pentru un punct care ar avea șansa să nu încalce restricția. Se repetă acest ciclu pînă cînd cel de al doilea punct cu valoarea funcției G(2) nu încalcă nici o restricție.

In continuare, se testează G(2) față de G(1). Dacă $G(2) < G(1)$ se trece la instrucțiunea cu eticheta 60 pentru a calcula următorul punct la distanță $X_i + 2pS_1$, iar dacă $G(2) > G(1)$ se schimbă semnul pasului, urmînd ca între instrucțiunile 31 și 40 toate elementele punctului cu indicele "1" să fie schimbată cu cele ale punctului cu indicele "2", în așa fel, ca următorul punct cel cu indicele "3" să corespundă lui

$x_i = pS_i$, conform specificațiilor din algoritm.

In continuare, între instrucțiunile 46 și 55 se calculează cel de al treilea punct caracterizat de $G(3)$ și $D(3)$. Dacă în acest calcul o restricție a fost încălcată se micșorează pasul la o pătrime și se repetă calculul prin revenire la instrucțiunea cu eticheta 80 pînă cînd nu mai există încălcări ale restricțiilor.

Presupunînd că s-a trecut și de acest ciclu, se dă valoarea finală lui $D(3) = D(2) + PANSOR$ și se testează $G(3)$ față de $G(2)$. Dacă $G(3) > G(2)$ înseamnă că între punctele $G(1)$, $G(2)$ și $G(3)$ se află minimul căutat și se trece la instrucțiunea cu eticheta 130. Dacă condiția de test nu este îndeplinită, se schimbă punctul cu indicele "2" cu cel cu indicele "1" și punctul cu indicele "3" cu cel cu indicele "2", se doublează pasul prin revenire la instrucțiunea cu eticheta 70 și se determină un nou punct cu indicele "3".

In momentul în care s-a ajuns la trei puncte între care se află minimul, s-ar pune problema interpolării. Dar aceste puncte se pot afla foarte îndepărtate pe direcția aleasă. Se știe că, aproximarea cu o formă pătratică este cu atît mai bună cu cît punctele de interpolare sunt mai apropiate. In consecință, se merge "înapoi" căutînd un nou punct cu indicele "4" la jumătatea ultimului pas avut.

Dacă condiția $G(4) > G(2)$ rămîne și acum, se va face interpolarea între punctele cu indicii "1", "2", și "4", ultimul de fapt fiind trecut prin instrucțiunile 83 și 86 în punctul cu indicele "3". Dacă în schimb $G(4) < G(2)$ se trece punctul cu indicele "2" în cel cu indicele "1" și punctul cu indicele "4" în cel cu indicele "2", urmînd a interpola tot între punctele "1", "2" și "3", cu ajutorul relației (116), lucru efectuat între instrucțiunile 101 și 105. După interpolare, se verifică relația (118) prin instrucțiunea 107.

Dacă testul a fost trecut, se consideră că minimul se află între punctul de "întoarcere" notat cu indicele "2" și cel obținut prin interpolare notat cu indicele "4" și se trece la instrucțiunea cu eticheta 200. Aici se face un test pentru a verifica dacă noul punct cu indicele "4" are aceeași valoare cu vechiul punct cu indicele "4", ceea ce ar presupune că funcția este constantă și prin trimiterea la instrucțiunea cu

eticheta 380 se dă indicatorului IER valoarea 1, urmând ca subroutine să se încheie. Dacă acest lucru nu se întimplă, de fapt foarte puțin probabil, se calculează funcția pentru argumentul de interpolare D(4) și apoi un nou punct cu indicele "4", la distanța unei jumătăți de pas "înapoi". Această operație se repetă atât timp cât este încălcată o restricție, prin revenire la instrucțiunea cu eticheta 200. În continuare, între instrucțiunile 123 și 125 sunt efectuate trei teste de sfârșit al algoritmului de căutare unidimensională, prin compararea cu mărimea de eroare EPS. Dacă unul din aceste teste este îndeplinit, se trece la instrucțiunea cu eticheta 320, de unde, după valorile avute de G(4), respectiv G(MIN), se alege minimul și algoritmul se încheie.

Dacă nici unul din teste nu a fost trecut, prin ciclul DO extins pînă la instrucțiunea cu eticheta 280, continuat cu instrucțiunile următoare pînă la cea cu numărul 162, în funcție și de semnul pasului, se alege cele trei puncte între care se află minimul și se revine la instrucțiunea cu eticheta 150 pentru o nouă interpolare. Aceste operații de interpolare se repetă pînă cînd unul din testele de sfârșit al algoritmului este satisfăcut.

In continuarea subprogramului, de la instrucțiunea cu eticheta 350 și pînă la sfârșitul său, se analizează cazurile de încheiere abnormală a subroutinei, stabilind indicatorul IER la valoarea corespunzătoare anomaliei detectate. Un caz special îl constituie situația în care relația (118) nu a fost verificată, cînd se mai încearcă de cinci ori, controlat de numărătorul KT, înlocuirea punctelor cu indicii "1" și "2" la coordonate date de semisuma distanței dintre punctul corespunzător și cel următor ca indice, apelând funcția pentru aceste noi puncte calculate și revenind la instrucțiunea cu eticheta 230 pentru verificarea testelor de sfârșit al algoritmului.

Această procedură este în concordanță cu specificațiile din punctul 2 al algoritmului care spune că, în ipoteza în care punctul de extrem este un maxim, procedeul de interpolare se repetă după ce punctul cel mai îndepărtat a fost eliminat.

2.3.4. Subprogramul FUNC

Subprogramul de tip rutină FUNC are ca obiectiv transcrierea în limbajul FORTRAN a funcției obiectiv, a relațiilor de restricții, a funcției obiectiv modificată după cerințele metodei

SUMT și a verificărilor restricțiilor în sensul menținerii drumului de căutare în domeniul admisibil. Parametrii care fac legătura la subrutină au următoarea semnificație:

- N - numărul de variabile independente față de care este definită funcția;
- Y - tablou conținând componentele punctului pentru care se evaluează funcția;
- R - factorul de penalizare;
- F - valoarea funcției calculată de subrutină;
- INDEX - indicator furnizat de subrutină care indică încălcarea unei restricții:
pentru INDEX = 0 nici o restricție nu a fost violată;
pentru INDEX = -1 cel puțin o restricție a fost violată.

Initial se pune indicatorul INDEX = 0 și se calculează valoarea funcției F. Apoi, între instrucțiunile 9 la 71 se calculează toate cele nouă restricții, pentru care trebuie îndeplinite condițiile de forma:

$$G_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, 9, \quad (295)$$

Între instrucțiunile 72 și 91 se impun condițiile de limită pentru variabile. În continuare subprogramul se verifică dacă o restricție sau o condiție de limită este încălcată, punind în acest caz indicatorul INDEX = -1. Dacă toate aceste teste au fost trecute, se formează noua funcție obiectiv, utilizând pentru funcția de penalizare cea mai bună formă recomandată de Fiacco și Mc. Cornick.

$$\vartheta(x, r) = F(x) - r \sum_{j=1}^9 \ln G_j(x) \quad (296)$$

urmând ca această valoare să fie returnată programului apelant.

3. Analiza și interpretarea rezultatelor

Strategia care a fost adoptată în utilizarea programelor de optimizare, special elaborate pentru funcția obiectiv reprezentând modelul matematic al costului mașinii de inducție urmează ideea enunțată anterior, în sensul utilizării programelor bazate pe algoritmi de căutare aleatoare pentru a furniza puncte de start în algoritmul metodei SUMT-POWELL, respectiv COMPLEX - BOX.

Primul program, ALEATOR, este cel mai lent. Calitatea sa esențială constă în posibilitatea incrementării variabilelor independente cu cantități predeterminate, corespunzătoare modificărilor tehnologice posibile în proiectarea unui prototip. Datorită atât timpului relativ mare de calcul, cât și controlului mai puțin precis în avansul către minim, datorită reducerii pseudoarbitrare a spațiului de căutare s-a considerat util a opri programul în momentul în care apropierea de minim era indubitată.

De menționat că în prima variantă a modelului matematic s-a utilizat pentru calculul curentului de magnetizare relația:

$$I_{\mu} = \frac{U_{if}}{x_1 + x_{1u}} \quad (297)$$

pentru a simplifica pe cât posibil modelul matematic și să foarte complex. Relația nu reflectă caracterul puternic neliniar al circuitului de magnetizare cu zone intens saturate din care cauză primul prototip realizat a avut un curent de magnetizare exagerat de mare ($I_{\mu} = 0,65 I_{ln}$); în consecință cu riscul complicării modelului matematic s-a introdus laborioasa subrutină MAGNET care calculează cu o precizie remarcabilă pe I_{μ} .

Pentru prima versiune a modelului matematic programul ALEATOR a rulat timp de 40 minute pornind de la $F(Y) = 4600$ lei, valoare ce reprezintă costul motorului inițial, oprit fiind în momentul cînd $F(X) = 2340,27$ lei.

Cel de al doilea program, bazat pe metoda complex a lui Box a fost rulat pornind de la punctul inițial.

Utilizând dimensiunea complexului $NN = 20$ și coeficientul $\alpha = 1,3$, valori recomandate de autorul metodei, algoritmul s-a încheiat după 131 interații, 26240 apeluri ale funcției și 2850 verificări ale relațiilor de restricții, la o valoare a funcției obiectiv de 2383,3 lei, în condițiile unei precizii impuse de 10^{-2} ca diferență dintre cea mai mare și cea mai mică valoare a funcției obiectiv, pentru ultimul complex analizat. Cu toate că, teoria metodei afirma că minimul obținut tinde către minimul global, în cazul problemelor studiate acest lucru nu a fost confirmat. Se presupune că, datorită geometriei funcției obiectiv un minim mai bun s-ar putea obține luând alte valori pentru dimensiunea complexului NN , respectiv coeficientului α , dar asupra modului în care ar trebui alese valori nu există în literatura de specialitate nici un fel de indicații. Problema ar putea constitui o temă de cercetare utilizând o variație semiempirică a acestor parametrii. Cu toate acestea, minimul mai sus menționat se apreciază deosebit de bun calitativ, iar ceea ce trebuie scos în evidență în cazul acestui program, asupra căruia s-au făcut unele intervenții în sensul măririi vitezei algoritmului, fiind constituie timpul foarte scurt de calculator, sub 10 minute, pentru aflarea soluției.

Cel mai dificil și totodată cel mai precis program întocmit fiind constituie celpentru optimizarea continuă prin metoda SUMT cu algoritmul Powell. Programului i s-au adus o serie de îmbunătățiri calitative față de unele variante existente în bibliografia avută la dispozitie (19), (34), ceea ce l-a făcut mult mai performant pentru problema de o complexitate cu cea studiată în prezenta lucrare. După punerea la punct a programului s-a ridicat problema determinării celor mai buni parametrii inițiali legați de procesul de desfășurare al algoritmului, mai precis pasul inițial PAS, termenul de convergență EPS, parametrii IR și NR a căror semnificație este dată în paragraful precedent.

Aceste considerente au rezultat din observația inițială menționată de fapt și în paragraful în care s-a discutat stabilirea algoritmilor, că problema ar avea mai multe minime locale, și că procesul de căutare a minimului se "agăță" de puncte

Cel de al doilea program, bazat pe metoda complex a lui Box a fost rulat pornind de la punctul inițial.

Utilizând dimensiunea complexului $NN = 20$ și coeficientul $\alpha = 1,3$, valori recomandate de autorul metodei, algoritmul s-a încheiat după 131 interații, 26240 apeluri ale funcției și 2850 verificări ale relațiilor de restrictii, la o valoare a funcției obiectiv de 2383,3 lei, în condițiile unei precizii impuse de 10^{-2} ca diferență dintre cea mai mare și cea mai mică valoare a funcției obiectiv, pentru ultimul complex analizat. Cu toate că, teoria metodei afirmă că minimul obținut tinde către minimul global, în cazul problemelor studiate acest lucru nu a fost confirmat. Se presupune că, datorită geometriei funcției obiectiv un minim mai bun s-ar putea obține luând alte valori pentru dimensiunea complexului NN , respectiv coeficientului α , dar asupra modului în care ar trebui alese valori nu există în literatura de specialitate nici un fel de indicații. Problema ar putea constitui o temă de cercetare utilizând o variație semiempirică a acestor parametrii. Cu toate acestea, minimul mai sus menționat se apreciază deosebit de bun calitativ, iar ceea ce trebuie scos în evidență în cazul acestui program, asupra căruia s-au făcut unele intervenții în sensul măririi vitezei algoritmului, îl constituie timpul foarte scurt de calculator, sub 10 minute, pentru aflarea soluției.

Cel mai dificil și totodată cel mai precis program întocmit îl constituie celpentru optimizarea continuă prin metoda SUMT cu algoritmul Powell. Programului i s-au adus o serie de îmbunătățiri calitative față de unele variante existente în bibliografia avută la dispozitie (19), (34), ceea ce l-a făcut mult mai performant pentru problema de o complexitate cu cea studiată în prezenta lucrare. După punerea la punct a programului s-a ridicat problema determinării celor mai buni parametrii inițiali legați de procesul de desfășurare al algoritmului, mai precis pasul inițial PAS, termenul de convergență EPS, parametrii IR și NR a căror semnificație este dată în paragraful precedent.

Aceste considerente au rezultat din observația inițială menționată de fapt și în paragraful în care s-a discutat stabilirea algoritmilor, că problema ar avea mai multe minime locale, și că procesul de căutare a minimului se "agăță" de puncte

în care hipersuprafețele de nivel întrețină hipersuprafețele restricțiilor. Pentru a confirma sau infirma această idee, s-a efectuat o exploatare semiempirică, modificând după o anumită strategie parametrii mai sus menționati. După eforturi de loc neglijabile, s-a ajuns la un set de valori ale acestor parametrii, care conduc la același minim, de fapt cel mai mic minim obținut și deci cu o foarte mare probabilitate minimul global al funcției obiectiv, corespunzător valorii de 2.135,40 lei. Acest rezultat îl considerăm ca un succes, atât prin valoarea minimului obținut față de valoarea inițială a prețului de cost, care aşa cum s-a amintit este de 4.600 lei, adică o reducere de peste 50 % cît și prin faptul că am putut pune în evidență, cu cea mai mare probabilitate că funcția obiectiv are un singur minim și acesta este minimul global.

In aceste condiții, drept date finale s-au prezentat pentru valorile optime ale parametrilor necesari procesului de optimizare, numai rezultatele obținute în trei cazuri analizate și anume:

- pornind de la setul de valori inițiale, ce definesc motorul asincron existent;
- pornind de la setul de valori inițiale obținute ca valori finale cu programul ALEATOR;
- pornind de la setul de valori inițiale obținute ca valori finale cu programul COMPLEX.

Se observă că toate aceste seturi de valori inițiale tot aşa cum s-ar putea considera și alte seturi de valori inițiale, conduce la același minim global.

Analizând minimul global se observă că el este pozitionat într-un punct al hiperspațiului în care șapte din cele zece condiții de margine sunt îndeplinite (deci ar fi vorba de un "colț" în 7 dimensiuni) și pentru care șase din cele două relații de restricții explicite tind către valoarea zero. Fără a avea pretenția de a "vedea" într-un spațiu cu zece dimensiuni, considerăm că și "geometric" un alt minim global nu ar putea exista.

Modul de variație al parametrilor în evoluția spre minim poate fi observat în special din analiza programelor ALEATOR și COMPLEX, în care s-au prevăzut imprimări intermediare. Din analiza acestui mod de variație se constată că variabila independentă dominantă este $Y(1)$ urmată de $Y(4)$, deoarece valoriile lor în procesul de minimizare ajung cel mai repede către limitele date inițial. Rezultă deci implicit că, modificări ale acestor variabile vor influența într-o mai mare măsură performanțele motorului.

In ce privește timpul necesitat de fiecare caz în parte, el este dependent de numărul de parcurgeri al algoritmului și numărul de apeluri ale funcției obiectiv. Se observă fără dificultate că acest timp de calcul este cu atât mai mic, cu cât punctul de start este mai apropiat de punctul de minim global. De aici și rațiunea utilizării preliminare a unui program de căutare aleatoare care să furnizeze punctul de start pentru programul metodei SUMT-POWELL.

Pentru a doua versiune a modelului matematic, în care s-a introdus subrutina MAGNET, pentru calculul curentului de magnetizare programul de optimizare s-a rulat în următorul mod :

(1). Plecînd de la datele inițiale s-a folosit programul ALEATOR, pe un timp de 100 minute în acest fel s-a redus valoarea funcției obiectiv de la 4.600 lei la 3.500 lei.

Folosirea algoritmului ALEATOR, în prima etapă a programului de optimizare, este justificată de faptul că acest algoritm conduce la minimul global al funcției obiectiv.

(2). Pornind de la valorile furnizate de programul ALEATOR, s-a rulat metoda SUMT cu algoritmul Powell, cu condiția de "insensibilizare" pentru ca algoritmul de tip continuu să poată fi aplicat pentru situații în care valorile parametrilor sunt modificate în mod discontinuu prin efectul subroutinei MAGNET. Considerăm că minimul obținut la valoarea de 3.286,71 lei, este destul de apropiat de minimul global apreciat la valoarea de aproximativ 3.100 lei.

(3). Rularea programelor prin metoda COMPLEX s-a pornit de asemenea de la setul de valori furnizate de programul ALEATOR.

S-a făcut o explorare semiempirică față de valorile parametrilor α , factorul de superreflexie și γ , care determină dimensiunea complexului și s-a ajuns la minimul funcției

obiectiv egal cu 3.202 lei pentru $\alpha = 1,3$ și $\gamma = 3$.

In cazul utilizării valorilor indicate de Box $\alpha = 1,3$ și $\gamma = 2$, minimul funcției se localizează la valoarea de 3.358,80 lei.

OBS. In anexele 13 + 18 sunt redate schemele logice, la nivel de instrucții, pentru programele și subprogramele descrise în acest capitol.

CAP. G. - UTILIZAREA PRACTICA A METODEI DE
OPTIMIZARE ELABORATE

1. Aplicarea metodei de optimizare elaborate pe un caz concret

Metoda de optimizare, utilizînd programarea neliniară, descrisă în capitolele D-F am aplicat-o concret pentru optimizarea motorului tip ASID-CT 200/4, 18,5 kW/1500 r/m cu rotor în dublă colivie.

In cele ce urmează se prezintă:

- 1.1. Domeniul de variație a lui Y .
- 1.2. Constante și pseudoconstante ce intră în expresiile parametrilor fizici.
- 1.3. Datele motorului în varianta inițială.
- 1.4. Tabele comparative cu parametrii principali ai motorului în varianta inițială și în varianta optimizată (tabela nr.5).
- 1.5. Extrase din listing-urile rezultate prin rularea pe calculatorul FELIX-C 256, a programelor ALEATOR-SUMT-POWELL și ALEATOR-COMPLEX, programe descrise în cap. F.
- 1.6. Tabel sintetic (nr.6) cu variația lui Y și $F(Y)$ din programul ALEATOR-COMPLEX, precum și reprezentarea lor grafică.
- 1.7. Desenele: tolelor stator-rotor, desen de gabarit precum și fișe de calcul, toate acestea atât pentru varianta inițială cât și pentru varianta optimizată.

2. Rezultate ale încercării prototipului

Prototipul realizat în baza proiectării optimale avînd la bază metodele de programare neliniară descrise anterior a fost supus la probe de tip în scopul verificării valorilor parametrilor fizici și a celor garantăți și compararea lor cu valorile

obținute prin calcul.

In continuare vom prezenta:

2.1. Buletinul emis de ICPE - București în colaborare cu laboratorul de mașini electrice al I.E.M.T.

2.2. Tabel comparativ (tabela nr.7) a valorilor principalelor parametrii fizici și parametrii de ieșire ai motorului, valori determinate prin calcul și respectiv rezultate din măsurători în laborator.

1.1. DOMENIUL DE VARIATIE A LUI - Y -

$$150 < y_1 < 200$$

$$130 < y_2 < 210$$

$$22 < y_3 < 34$$

$$115 < y_4 < 190$$

$$20 < y_5 < 36$$

$$15 < y_6 < 40$$

$$50 < y_7 < 110$$

$$24 < y_8 < 40$$

$$3 \cdot 10^{-4} < y_9 < 6 \cdot 10^{-4}$$

$$20 < y_{10} < 50$$

1.2. CONstanTE SI PSEUDOCONSTANTE

OBS. Valorile numerice se referă la aplicația numerică pentru verificarea practică a metodei elaborate (motor ASID 18,5/1500 - cu rotor în dublă colivie.)

(a). Constante referitoare la materiale și manoperă

$$k_1 = \gamma_{Fe} c_{Fe} = 94,593, \cdot 10^3 \text{ lei/m}^3$$

$$\gamma_{Fe} = 7,85 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$c_{Fe} = 12,05 \text{ lei/kg}$$

$$k_1' = \gamma_{Fe} c_{pFe} \frac{1}{G_{Fe}} = 0,721 \cdot 10^3 \text{ lei/m}^3$$

$$k_2 = \gamma_{cu} c_{cu} = 803,225 \cdot 10^3 \text{ lei/m}^3$$

$$\gamma_{cu} = 8,9 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$c_{cu} = 90,25 \text{ lei/kg}$$

$$k_2' = \gamma_{cu} c_{pcu} \frac{1}{G_{cu}} = 27,704 \cdot 10^3 \text{ lei/m}^3$$

$$k_3 = \gamma_{iz} \cdot c_{iz} = 66,81 \cdot 10^3 \text{ lei/m}^3$$

$$\gamma_{iz} = 1,31 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$c_{iz} = 51 \text{ lei/kg}$$

$$k_4 = \gamma_{Al} c_{Al} = 40,5 \cdot 10^3 \text{ lei/m}^3$$

$$\gamma_{Al} = 2,7 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$c_{Al} \approx 15 \text{ lei/kg}$$

$$k_4' = \gamma_{Al} c_{pAl} \frac{1}{G_{Al}} = 0,625 \cdot 10^3 \text{ lei/m}^3$$

$$k_5 = \gamma_{Fe} c_{Fo} = 67,51 \cdot 10^3 \text{ lei/m}^3$$

$$\gamma_{Fe} = 7,85 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$c_{Fo} = 8,6 \text{ lei/kg}$$

$$k_5' = \gamma_{Fe} c_{pc} \cdot \frac{1}{G_c} = 1,764 \cdot 10^3 \text{ lei/m}^3$$

(b). Constante si pseudoconstante constructive si referitoare la parametrii:

$$K_1 = f_{ln} k_{dc} = 0,768 \cdot 1,082 \quad 0,831 \quad f.d.$$

$$K_2 = K_{dc}^2 c_{piz} = 1,082 \cdot 1,3^2 \cdot 2 \cdot 10^6 = 3,657 \cdot 10^{-6} \quad m^2$$

K_3 = reprezintă lungimea axială a capetelor de bobină

$$K_3 = 20 \cdot 10^{-3} \quad m$$

K_4 = pseudoconstantă ce ține seama de curbura capetelor de bobină;

$$K_4 = 1,3 \quad f.d.$$

$$K_5 = K_4 \frac{\pi}{2_p} = 1,021 \quad f.d.$$

$$K_6 = \frac{S_{iz\ tot}}{S_{izcu}} = 1,28 \quad f.d.$$

$S_{iz\ tot}$ = suprafața totală a izolațiilor

S_{izcu} = suprafața izolațiilor din crestătură

$$K_7 = 2 K_6 \left(\frac{L_{tc}}{L_p} \right) Z_1 \approx 147,45 \quad f.d.$$

$$L_{tc}/L_p \approx 1,2$$

L_{tc} = lungimea tecii izolante

$$K_8 = \frac{G_{Al}}{G_b + G_{in}} = 1,06; 1,4 \quad f.d.$$

G_{al} = masa totală a coliviei din Al
(inclusiv aripioare de răcire,
stifturi pt. fixare greutăți de
echilibrare)

$G_b + G_{in}$ = masa aluminiului din bare și
inele de scurtcircuitare

$$K_9 = \frac{2\pi}{\sin \frac{\pi p}{Z_2}} \cdot \frac{1}{b_8 \cdot \beta_{Al75^\circ}} = 1,543 \quad \frac{m}{\Omega \text{ mm}^2}$$

$$K_{10} = \frac{P_{cs+r}}{P_{cs}} = 1,4 \quad f.d.$$

P_{cs+r} - prețul părților constructive plus rulmenți;

P_{is} - prețul părților constructive (carcasă, scuturi, arbore)

$$K_{11} = \frac{z_1}{n_1 a_1^2} = 1 \quad f.d.$$

$$K_{12} = \frac{4}{\pi} \delta_{Cu20^\circ} \cdot \frac{K_{11}}{K_1} = 0,0267 \quad \frac{\Omega \text{ mm}^2}{m}$$

$$K_{13} = \frac{3y_{opt} + 1}{4} = 0,875 \quad f.d.$$

$$K_{14} = \frac{\pi f_{lw}^2}{8,9 \cdot \delta \cdot k_S \cdot k_{sat} z_1} = 6,14826 \quad m^{-1}$$

$$K_{15} = 0,57 \frac{\pi Z_1}{4 p_{m_1}^2} \cdot \frac{3y_{opt-1}}{2} = 1,343 \quad f.d.$$

$$K_{16} = 2 \pi f \mu_0 \frac{z_1}{m_1 a_1^2} = 2 \pi f \mu_0 K_{11} = 3,94785 \cdot 10^{-4} \quad \Omega/m$$

$$K_{17} = \frac{z_1^2 f_{lw}^2}{z_2^2 m_1 a_1^2} = K_{11} f_{lw}^2 \frac{z_1}{z_2} = 0,833 (= f_{lw}) \quad f.d.$$

$$K_{18} = \frac{j_{2i}}{j_{2b}} = 0,65 \quad f.d.$$

j - densitatea de curent

$$K_{19} = \frac{1}{p K_{18}} = 0,077 \quad f.d.$$

$$K_{20} = 2 \pi f \mu_0 = \frac{K_{16}}{K_{11}} = 3,94785 \cdot 10^{-4} \quad \Omega/m$$

$$K_{21} = \frac{\pi}{8,9 z_2 \delta k_S K_{sat}} = \frac{K_{14}}{f_{lw}^2} \cdot \frac{z_1}{z_2} = 10,624 \quad m^{-1}$$

$$K_{22} = 0,9 K_{18} \frac{z_2^2}{9,6 p^2} = 24,375$$

- 185 '-

$$K_{23} = \gamma_{Fe} \cdot k_{1Fe} = 7,85 \cdot 10^3 \cdot 0,95 = 7,4575$$

$$K_{24} = \frac{K_{iz}}{z_1} = 0,025$$

$K_{iz} = \frac{s_1}{s_{\text{net}}} = \text{raportul dintre secțiunile brută și netă a crestăturii statorice}$

$$K_{iz} \approx 1,2$$

$$K_{25} = 2 \sqrt{(k_{\delta-1})^3 \frac{\pi}{z_1}} = 0,028 \quad \text{f.d.}$$

$$K_{26} = \int A_{175^\circ} z_2 K_b^2 = 37,396 \quad w \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

unde:

$$K_b = \frac{K_{rot} f_{lw} z_1 (1 + \zeta_1) P_N}{m_1 a_1 z_2 U_{lf}} = 4,636 \quad A$$

$$\zeta_1 \approx 0,023; \quad \zeta_2 \approx \frac{x_2}{x_1} \zeta_1 = 0,046; \quad K_{rot} \approx 1,117$$

$$K_{27} = \frac{\pi}{4} 10^4 \frac{K_{m+v}}{p^2} = 7,752 \cdot 10^4 \frac{K_{m+v}}{p^2} = 3,6822 \cdot 10^4 \quad \text{f.d.}$$

K_{m+v} - coeficient determinat experimental
pentru $2p = 2 \quad K_{m+v} = 1,9$

$$K_{28} = \pi \Delta_{iz} \sqrt{c_p \cdot f_{ln}} = 0,9734 \cdot 10^{-3} \quad m$$

$$K_{29} = 2 \beta_{str} = 0,5 \cdot 10^{-3} \quad m$$

$$K_{30} = K_{iz} \beta_{str} = 0,6 \cdot 10^{-3} \quad m$$

$$K_{31} = (1 - 0,785 f_{ln}) = 0,397 \quad \text{f.d.}$$

$$K_{32} = (1 - 2,2876 f_{ln}) = 0,7568 \quad \text{f.d.}$$

$$K_{33} = \sqrt{\frac{f_{ln}}{c_p}} = 0,6197 \quad \text{f.d.}$$

$$K_{34} = \frac{\pi}{z_1} = 0,0654 \quad \text{f.d.}$$

$$K_{35} = \frac{\pi}{z_2} = 0,0785 \quad \text{f.d.}$$

1.3. DATELE MOTORULUI INITIAL :

$$P_n = 18,5 \text{ kW}$$

$$\eta_N = 0,89$$

$$n = 1500 \text{ rot/min}$$

$$\cos \varphi_N = 0,84$$

$$U_{lf} = 220 \text{ V}$$

$$M_p/M_n = 2,4$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$M_{max}/M_n = 2,7$$

$$m_1 = 3$$

$$I_p/I_n = 5,5$$

$$p = 2$$

$$\Delta \theta_a = 75^\circ\text{C}$$

$$S_n = 0,03$$

$$I_n = 37,49 \text{ A}$$

$$M_n = 117,78 \text{ Nm} = 12 \text{ kgf}\cdot\text{m}$$

DATE CONSTRUCTIVE SI DE CALCUL

$$z_1 = 48$$

$$d_{cu} = 1,25 \times 211 \text{ mm}$$

$$z_2 = 40$$

$$f_{lu} = 0,768$$

$$z_p = 147,65 \text{ mm}$$

$$P_{as} = 1-12$$

$$\delta = 0,7 \text{ mm}$$

$$L_{lfm} = 250 \text{ mm}$$

$$G_{cu} = 18,5 \text{ kg}$$

$$b_{ls} = 3 \text{ mm}$$

$$\beta_1 = 0,917$$

$$h_{ls} = 0,6 \text{ mm}$$

$$f_{lw} = 0,949$$

$$h_{2s} = 1,9 \text{ mm}$$

$$f_{lz} = 0,958$$

$$h_{1z} = 0,25 \text{ mm}$$

$$k_\delta = 1,144$$

$$k_{rot} = 1,12$$

$$b_{ir} = 1 \text{ mm}$$

$$k_{1Fe} = 0,97$$

$$h_{ir} = 0,4 \text{ mm}$$

$$G_{Fe} = 145,31 \text{ kg}$$

$$\begin{aligned}a_1 &= 45 \text{ mm} \\b_1 &= 24 \text{ mm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\lambda_{1c} &= 1,643 \\ \lambda_{1d} &= 1,157 \\ \lambda_{1f} &= 1,092\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}Y_1 &= D_{si} = 188 \text{ mm} \\Y_2 &= L_p = 200 \text{ mm} \\Y_3 &= h_s = 27 \text{ mm} \\Y_4 &= S_{1 \text{ net}} = 185 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\lambda_{2c} &= 4,707 \\ \lambda_{2d} &= 1,526 \\ \lambda_{2f} &= 0,340\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}Y_5 &= h_{1j} = 31,6 \text{ mm} \\Y_6 &= S_{brp} = 39 \text{ mm}^2 \\Y_7 &= S_{bre} = 102 \text{ mm}^2 \\Y_8 &= hr = 34,4 \text{ mm} \\Y_9 &= X_e = 4,6791 \cdot 10^{-4} \\Y_{10} &= Nc = 42 \text{ spire/crest.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}P_{cul} &= 705 \text{ W} \\P_{AL} &= 467,5 \text{ W} \\P_{Fe} &= 364 \text{ W} \\P_{m+v} &= 250 \text{ W} \\P_o &= 653 \text{ W}\end{aligned}$$

$$\beta_{cu20^\circ} = 0,0175 \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$\beta_{AL75^\circ} = 0,0435 \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$f_{10} = 2,6 \text{ W/kg}$$

$$\begin{aligned}B_\delta &= 0,592 \text{ T} \\K &= 1,345 \\zeta_1 &= 0,768 \\f_B &= 1,083 \\zeta_1 &= 0,025\end{aligned}$$

$$\zeta_2 = 0,046$$

$$\begin{aligned}X_j &= 0,83 \\C_1 &= 1,58185 \\C_2 &= 2,3215\end{aligned}$$

$$R_{120^\circ} = 0,135$$

$$x_1 = 0,529$$

$$R_{275^\circ} = 0,135$$

$$x_2 = 0,967$$

$$x_k = 1,521$$

$$x_{2s} = 0,765$$

$$x_p = 1,265$$

$$R_{2r} = 0,369$$

$$R_k = 0,305$$

$$\beta_{STR_s} = 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\lambda_{str_s} = \lambda_{em_s} = 0,200 \text{ W/}^{\circ}\text{C m}$$

$$\lambda_a = 0,025 \text{ W/}^{\circ}\text{C m}$$

$$\alpha^\circ = 14,2 \text{ W/}^{\circ}\text{C m}^2$$

$$K_a \approx (m/s)^{\frac{1}{2}}$$

$$v_a \approx f(p, gab); \quad \text{pt. } p=2 \quad \begin{cases} \text{Gab. 7} \Rightarrow 7 \text{ m/s} \\ \text{Gab. 6} \Rightarrow 6 \text{ m/s} \end{cases}$$

$$d_{cu_{1z}} = 1,3 \text{ mm}$$

$$\Delta_{iz_{cu}} = 0,05 \text{ mm}$$

$$D_{pi} = 60 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

**1.4. MARINI GEOMETRICE PRINCIPALE SI PARAMETRII FIZICI PRINCIPALI
(date comparative).**

Tabel Nr 5

Tip motor	y_1 (D_{si}) mm.	y_2 (L_P) mm	y_3 (h_s) mm	y_4 (S_{negt}) mm 2	y_5 (h_u) mm	y_6 (S_{brp}) mm 2	y_7 (S_{brl}) mm 2	y_8 (h_r) mm	y_9 (x_1) x_2) mm	y_{10} (H_c) nr.	δ mm	d_{cu} mm	Z_1	Z_2	G. %
Varianta Initială	188	200	27	185	31,6	39	102	34,4	4,679-10 ⁴	42	0,7	1,25-2//	48	40	19
Varianta optimizată	164	200	24,5	119,5	24,7	15,2	90,8	30,6	4,33-10 ⁴	38	0,5	1,05-2//	48	40	15

Tip motor	$R_{1,20}^o$ Ω	X_1 Ω	$R_{2,73}^o$ Ω	X_2^i Ω	$X_{2,s}$ Ω	R_P Ω	X_P Ω	R_K Ω	X_K Ω	P_{cu1} W	P_{cu1} W	P_{mv} W	P_o W	η	c_{asf}	M_P Nm	I_P A	θ_C °C	
Varianta Initială	0,135	0,529	0,135	0,369	0,987	0,765	0,513	1,265	0,305	1,521	705	467,5	364	250	653	0,907	0,835	334,5	208
Varianta optimizată	0,1643	0,436	0,1475	0,34	0,7366	0,5926	0,486	1,0434	0,355	1,191	824	515	507	159	728	0,898	0,8301	302,08	202,29

```

X1= 0.14295874   X2= 0.4732355   X3= 0.1557777   X4= 0.742715   X5= 0.73115
X6= 0.56162   X7= 0.3242547   P4L= 534.46   P4L= 543.77   M1U= 12.58
PCLC= 68.36   PSUPPL= 9.6.53   PV= 12.0.26   A= 1.0.04x57   S!= 0.262357
X6!= 5.8235137   X7!= 4.20352.0   Z!= 5.9465624   I2!= 31.816.124. A= 31.157
I2!= 6.44.1   I1!= 37.52.45   PCL1= 754.145   PTYT= 21.0.125   SETA= 0.108356E-02
S0!= 0.67372   STCNS= 0.54633.1   X1ZS= 0.3397282   IETACU-FE= 29.261   SV= 0.8195
S0= 0.1187   PCF= 0.11874   TE1CA= 39.0239   TE1ACU= 72.9845
VALUESFILE FES19IC11LDR
G1= 27.042641   G2= 8/.0.5254   G3= 2.0.2233   G4= 0.5078
G5= 0.6220   G6= 0.3017   G7= 1.0.3155   G8= 0.2526   G9= 1.0.3324

```

```

IEV= 0   I= 970   K= 22   INDEX= 0   INDEX= 0   INDEX= 0   INDEX= 0
F1= 0.2272.0E+04   105.042226159   26.90056522   138.0.015234   25.200.50.910
X1= 1.64.45.0.6.6.68   62.9622374.0   32.2525541.0   0.037632.0   39.764.562.53
X2= 16.0.87332326   6.2.9622374.0

```

```

IEV= 0   I= 1340   K= 4   INDEX= 0   INDEX= 0   INDEX= 0   INDEX= 0
F1= 0.2662.0E+04   105.042226159   26.90056522   138.0.015234   25.200.50.910
X1= 1.64.45.0.6.68   61.0.651.6.46   31.87892.44
X2= 16.0.57296.0.08

```

```

IEK= 0   I= 1463   K= 1   INDEX= 0   INDEX= 0   INDEX= 0   INDEX= 0
F1= 0.328668E+04   105.042226159   26.90056522   138.0.015234   25.200.50.910
X1= 1.64.427038.0.456   81.0.6421057   31.97423.554
X2= 16.0.67882756   81.0.6421057

```

```

IEK= 0   I= 1608   K= 1   INDEX= 0   INDEX= 0   INDEX= 0   INDEX= 0
F1= 0.328672E+04   105.042226159   26.90056522   138.0.015234   25.200.50.910
X1= 1.64.4272243.0.7   81.0.6421057   31.97891.363
X2= 16.0.680564.0.2

```

R120= *15.2 512 X1= *4.532620 R127= *1.628783 X1S= *4.67859 X21= *6.89243
 X215= *505.545 224 R= *257.335 R128= 536.14 PAL= 561.57 MMU= 10.28
 PCU1= 47.92 FSUPL= 92.5G R129= 150.55 LCA= 1.1283478 SN= *C29214/
 R130= 5.0316512 XKA= 1.1654234 ZKA= 5.3461325 I21= 31.815 121A= 31.207
 -122 R= 6.210 L1F= 135.2981 PCU1= 745.558 PTG1= 2091.420 SETA= *133882L-02
 L12A= *C774433 STCRs= *5353773 R1Z5= --.3396227 TETACL-FE= 29.248 SV= *2588
 SC= *1132 RC= *C1944 TETACA= 4C.6916 TETACU= 74.9999
 - VHL6RILE RESTRICTILQR
 G1= 9.2382 G2= 35.3113 G3= *C984 G4= *C984
 G5= *0508 G6= *0008 G7= *0001 G8= 1.3333 G9= *8017

GEOMETRIA CESTATIPII
 R120= 6.355 R121= 371P= 6.113 T2Y= 1.329
 D112= 12.512 D1= 1.391 RS1= 1.000
 D112= 1.141 D2= 2.727 RS2= 1.500
 S11= 153.034 RS3= 3.679 RS1= 1.300
 DEP= 4.036 R114= 3.232 RS2= 1.701
 R115= 3.232 R116= 1.6201 E2L= 1.737

ESTOP*

2605 39X A1= 2.150 PH= 2002 DATE = 07/12/78
 H.DEB = 1CH 29M 24S H.RIN = 1CH 32M 14S TIME = 00015775
 LGP = CCC42 LEM = CCC2C LG = 00013 IN = 00013 OUT = 00000
 MT = C1 CP = C1 CR = C1

E9J

EST SAVE

JB START; AN:21ET, PPN: COMPLEX
FETCH LN: *4
RUN TIME: 18.0NL: 500.00
STARTED

i=10 NR= 2 ITER=200 FDS= -0.10000E-01

LIMITELE INTERVALULUI DE CARE VA FI TIRUIT

A(I) LA S(I) =
• 150000E+03 • 2.10000E+03
• 120000E+03 • 2.10000E+03
• 200000E+02 • 340000E+02
• 145000E+03 • 1.90000E+03
• 200000E+02 • 360000E+02
• 150000E+02 • 400000E+02
• 500000E+02 • 1.10000E+03
• 240000E+02 • 400000E+02
• 300000E+03 • 600000E+03
• 200000E+02 • 500000E+02

ITERATIA 1 N= 30 M= 222

FUNCTIA 1 AL COMPLEXULUI F= -0.3497741E+04

X= • 1707000E+03 • 19.0000E+03 • 2650000E+02 • 1430000E+03 • 2510000E+02
• 1703000E+02 • 8400000E+02 • 2650000E+02 • 4248000E+03 • 3900000E+02

FUNCTIA 2 AL COMPLEXULUI F= • 2.492663E+04

X= • 1705333E+03 • 1327313E+03 • 2653212E+02 • 1432600E+03 • 2539383E+02
• 1714627E+02 • 8330453E+02 • 264171E+02 • 4257512E+03 • 3826339E+02

PUNCTUL 3 AL COMPLEXULUI F = • 349572•E+04

$$X = \frac{•1726469E+03}{•1709503E+02} \quad \frac{•18289•1E+03}{•83290084E+02} \quad \frac{•2667066E+02}{•2650034E+02} \quad \frac{•1431608E+05}{•4250190E-03} \quad \frac{•2540913E+02}{•3286652E+02}$$

PUNCTUL 4 AL COMPLEXULUI F = •3496994E+04

$$X = \frac{•1726925E+03}{•1709215E+02} \quad \frac{•1328323F+03}{•3294522F+02} \quad \frac{•2689582E+02}{•2654767E+02} \quad \frac{•1432122E+05}{•4257973E-03} \quad \frac{•2503157E+02}{•3395104E+02}$$

PUNCTUL 5 AL COMPLEXULUI F = •3554992E+04

$$X = \frac{•1729457E+03}{•1716735E+02} \quad \frac{•1874983E+03}{•8021180F+02} \quad \frac{•2689765E+02}{•2769426E+02} \quad \frac{•1431775E+05}{•4434044E-03} \quad \frac{•2544663E+02}{•3904259E+02}$$

PUNCTUL 6 AL COMPLEXULUI F = •3557943E+04

$$X = \frac{•1715256E+03}{•1714304E+02} \quad \frac{•1320250E+03}{•8321234F+02} \quad \frac{•2689275E+02}{•2678753E+02} \quad \frac{•1433423E+05}{•4283937E-03} \quad \frac{•2593422E+02}{•3629395E+02}$$

PUNCTUL 7 AL COMPLEXULUI F = •3511613E+04

$$X = \frac{•1711163E+03}{•1738442E+02} \quad \frac{•1896546E+03}{•3303137F+02} \quad \frac{•2692782E+02}{•2692714E+02} \quad \frac{•1435308E+05}{•4294370E-03} \quad \frac{•2557186E+02}{•3869398E+02}$$

PUNCTUL 8 AL COMPLEXULUI F = •3556857E+04

$$X = \frac{•1713593E+03}{•1722207E+02} \quad \frac{•1393132F+03}{•8315451E+02} \quad \frac{•2659887E+02}{•2677392E+02} \quad \frac{•1431927E+05}{•4238850E-03} \quad \frac{•2563998E+02}{•3865412E+02}$$

PUNCTUL 9 AL COMPLEXULUI F = •3553223E+04

$$X = \frac{•1712505E+03}{•1716296E+02} \quad \frac{•1582627E+03}{•8315674F+02} \quad \frac{•2632277E+02}{•2678212E+02} \quad \frac{•1452237E+05}{•3232312E-03} \quad \frac{•2531485E+02}{•3868269E+02}$$

PUNCTUL 10 AL COMPLEXULUI $F = -0.3523555 \cdot 10^{-4}$

$$x = \begin{aligned} & 0.171255245E+03 \\ & 0.17459938E+02 \end{aligned} \quad \begin{aligned} & 0.4554824F+03 \\ & 0.4353372F+02 \end{aligned} \quad \begin{aligned} & 0.2699632E+02 \\ & 0.2588142E+02 \end{aligned} \quad \begin{aligned} & 0.1438969E+03 \\ & 0.1393315E-03 \end{aligned} \quad \begin{aligned} & 0.2545489E+02 \\ & 0.3821268E+02 \end{aligned}$$

PUNCTUL 11 AL COMPLEXULUI $F = -0.3535555 \cdot 10^{-4}$

$$x = \begin{aligned} & 0.1712245E+03 \\ & 0.1722655E+02 \end{aligned} \quad \begin{aligned} & 0.1392627F+03 \\ & 0.832323F+02 \end{aligned} \quad \begin{aligned} & 0.2698275E+02 \\ & 0.2679387E+02 \end{aligned} \quad \begin{aligned} & 0.1433152E+03 \\ & 0.4292355E-03 \end{aligned} \quad \begin{aligned} & 0.2534377E+02 \\ & 0.326774CE+02 \end{aligned}$$

PUNCTUL 12 AL COMPLEXULUI $F = -0.3535555 \cdot 10^{-4}$

$$x = \begin{aligned} & 0.17123357E+03 \\ & 0.1762133E+02 \end{aligned} \quad \begin{aligned} & 0.1389149CE+03 \\ & 0.84140964F+02 \end{aligned} \quad \begin{aligned} & 0.13753867E+02 \\ & 0.2725151E+02 \end{aligned} \quad \begin{aligned} & 0.1417306E+03 \\ & 0.4385662E-03 \end{aligned} \quad \begin{aligned} & 0.25442344E+02 \\ & 0.393275E-02 \end{aligned}$$

PUNCTUL 13 AL COMPLEXULUI $F = -0.3787305E+04$

$$x = \begin{aligned} & 0.163465E+03 \\ & 0.2134736E+02 \end{aligned} \quad \begin{aligned} & 0.1955724F+03 \\ & 0.87153526F+02 \end{aligned} \quad \begin{aligned} & 0.2487239E+02 \\ & 0.3198655E+02 \end{aligned} \quad \begin{aligned} & 0.1322912E+03 \\ & 0.3724721E+02 \end{aligned} \quad \begin{aligned} & 0.2271110E+02 \\ & 0.32356219E+02 \end{aligned}$$

PUNCTUL 14 AL COMPLEXULUI $F = -0.3522233E+04$

$$x = \begin{aligned} & 0.1711372E+03 \\ & 0.1946752E+02 \end{aligned} \quad \begin{aligned} & 0.1885042F+03 \\ & 0.8520741E+02 \end{aligned} \quad \begin{aligned} & 0.2755920E+02 \\ & 0.2739365E+02 \end{aligned} \quad \begin{aligned} & 0.1444534E+03 \\ & 0.4305023E-03 \end{aligned} \quad \begin{aligned} & 0.2533201E+02 \\ & 0.3633909E+02 \end{aligned}$$

PUNCTUL 15 AL COMPLEXULUI $F = -0.3518948E+04$

$$x = \begin{aligned} & 0.1689512E+03 \\ & 0.2123553E+02 \end{aligned} \quad \begin{aligned} & 0.1873034E+03 \\ & 0.8970322F+02 \end{aligned} \quad \begin{aligned} & 0.2792177E+02 \\ & 0.2979965E+02 \end{aligned} \quad \begin{aligned} & 0.1423044E+03 \\ & 0.4683551E-03 \end{aligned} \quad \begin{aligned} & 0.2503166E+02 \\ & 0.3305213E+02 \end{aligned}$$

PUNCTUL 16 AL COMPLEXULUI $F = -0.3530714E+04$

$$x = \begin{aligned} & 0.172244E+03 \\ & 0.1853355E+02 \end{aligned} \quad \begin{aligned} & 0.1375739F+03 \\ & 0.8332402F+02 \end{aligned} \quad \begin{aligned} & 0.265930E+02 \\ & 0.2748473E+02 \end{aligned} \quad \begin{aligned} & 0.1423247E+03 \\ & 0.4382717E-03 \end{aligned} \quad \begin{aligned} & 0.2504840E+02 \\ & 0.3823650E+02 \end{aligned}$$

PUNCTUL 17 AL COMPLEXULUI $F = -0.3527169E+04$

X= • 1721513E+03 • 1392323F+03 • 269C719E+32 • 1423183E+03 • 2537824E+02
• 1836241E+02 • 8326545F+02 • 2745732E+32 • 4372725E-03 • 3824661E+02

PUNCTUL 18 AL COMPLEXULUI F= • 3528805E+04

X= • 1720543E+C3 • 1397717F+C2 • 2685379E+02 • 1426609E+03 • 2535834E+02
• 18C163CE+C2 • 837b345E+02 • 2747270E+02 • 4376256E-03 • 3823172E+02

PUNCTUL 19 AL COMPLEXULUI F= • 3529632E+04

X= • 1724771E+03 • 1395323F+03 • 2686841E+52 • 1426327E+03 • 2532022E+02
• 1839-21E+02 • 8332675F+02 • 2741026E+02 • 4388531E-03 • 3824444E+02

PUNCTUL 20 AL COMPLEXULUI F= • 3523512E+04

X= • 1725331E+C3 • 1394254E+03 • 2685353E+02 • 1425695E+03 • 2533469E+02
• 1797556E+C2 • 8337024F+C2 • 2745965E+02 • 4381042E-03 • 3825784E+02

PUNCTUL 21 AL COMPLEXULUI F= • 3531843E+04

X= • 1721155E+C3 • 1396891F+03 • 2687571E+02 • 1426915E+03 • 2532184E+02
• 1797325E+C2 • 8368678F+02 • 2743C53E+02 • 4381062E-03 • 3823201E+02

PUNCTUL 22 AL COMPLEXULUI F= • 3531958E+04

X= • 175165E+C3 • 1381217F+C3 • 2667c25E+02 • 1407549E+03 • 2548721E+02
• 1847330E+C2 • 8181122F+02 • 2898C65E+02 • 4430133E-03 • 3940099E+02

PUNCTUL 23 AL COMPLEXULUI F= • 3554715E+04

X= • 176357E+C3 • 1382165F+C3 • 26932581+C2 • 1432276E+C3 • 2543494E+02
• 1927245E+C2 • 83443494F+C2 • 2744523E+C2 • 4415651E-03 • 3929323E+02

PUNCTUL 24 AL COMPLEXULUI F= • 3552474E+04

$X =$	$\bullet 1718595E+03$	$\bullet 1292314E+03$	$\bullet 2694658E+02$	$\bullet 1427163E+03$	$\bullet 2502140E+02$
$\cdot 1820831E+02$	$\cdot 8341544E+02$	$\cdot 2755936E+02$	$\cdot 4364711E-03$	$\cdot 3901679E+02$	$\cdot 390163E+02$
PUNCTUL 25 AL COMPLEXULUI	F =	$\bullet 3523573E+04$			
$X =$	$\bullet 1722707E+03$	$\bullet 1891312E+03$	$\bullet 2634157E+02$	$\bullet 1425110E+03$	$\bullet 2502363E+02$
$\cdot 1814223E+02$	$\cdot 8358143F+02$	$\cdot 2752337E+02$	$\cdot 4372825E-03$	$\cdot 3901163E+02$	$\cdot 3901163E+02$
PUNCTUL 26 AL COMPLEXULUI	F =	$\bullet 3493826E+04$			
$X =$	$\bullet 1723114E+03$	$\bullet 1860745E+03$	$\bullet 2724859E+02$	$\bullet 1434170E+03$	$\bullet 2530499E+02$
$\cdot 1818520E+02$	$\cdot 83218553F+02$	$\cdot 273431E+02$	$\cdot 4394658E-03$	$\cdot 3940277E+02$	$\cdot 3940277E+02$
PUNCTUL 27 AL COMPLEXULUI	F =	$\bullet 345215E+04$			
$X =$	$\bullet 1704121E+03$	$\bullet 1368164E+03$	$\bullet 2618743E+02$	$\bullet 1375064E+03$	$\bullet 275572/E+02$
$\cdot 1730134E+02$	$\cdot 8390312F+02$	$\cdot 3627261E+02$	$\cdot 4514019E-03$	$\cdot 401597/E+02$	$\cdot 401597/E+02$
PUNCTUL 28 AL COMPLEXULUI	F =	$\bullet 3525754E+04$			
$X =$	$\bullet 1721141E+03$	$\bullet 1892439E+03$	$\bullet 268844CE+02$	$\bullet 1425201E+03$	$\bullet 2555687E+02$
$\cdot 1816869E+02$	$\cdot 8375364E+02$	$\cdot 2763467E+02$	$\cdot 4377694E-03$	$\cdot 3905000E+02$	$\cdot 3905000E+02$
PUNCTUL 29 AL COMPLEXULUI	F =	$\bullet 3568601E+04$			
$X =$	$\bullet 1752933E+03$	$\bullet 1830549F+03$	$\bullet 2701436E+02$	$\bullet 1475688E+03$	$\bullet 2655236E+02$
$\cdot 1836332E+02$	$\cdot 7933877E+02$	$\cdot 2938573E+02$	$\cdot 4211464E-03$	$\cdot 3906944E+02$	$\cdot 3906944E+02$
PUNCTUL 30 AL COMPLEXULUI	F =	$\bullet 3490548E+04$			
$X =$	$\bullet 1729234E+03$	$\bullet 1856251F+03$	$\bullet 2669271E+02$	$\bullet 1439177E+03$	$\bullet 2538350E+02$
$\cdot 1794037E+02$	$\cdot 8344373F+02$	$\cdot 2814649E+02$	$\cdot 4410484E-03$	$\cdot 3941026E+02$	$\cdot 3941026E+02$

• 1517432E+02 • 9081347F+02 • 3053318E+02 • 4329762E-03 • 3813543E+02

ITERATIA1600 M= 48000 M1= 3583

PUNCTUL 1 AL COMPLEXULUI F= • 3202534E+04

X= • 1636951E+03 • 2011625F+03 • 2447117E+02 • 1194915E+03 • 2405409E+02
• 1516899E+02 • 9035873F+02 • 3058034E+02 • 4331421E-03 • 3812890E+02

PUNCTUL 2 AL COMPLEXULUI F= • 3202508E+04

X= • 1636939E+03 • 2011633E+03 • 2447089E+02 • 1194912E+03 • 2405413E+02
• 1515918E+02 • 9085743F+02 • 3058035E+02 • 4331337E-03 • 3812354E+02

PUNCTUL 3 AL COMPLEXULUI F= • 3202525E+04

X= • 1636947E+03 • 2011630F+03 • 2447105E+02 • 1194915E+03 • 2405417E+02
• 1516910E+02 • 9085303E+02 • 3058029E+02 • 4331395E-03 • 3812854E+02

PUNCTUL 4 AL COMPLEXULUI F= • 3202501E+04

X= • 1636934E+03 • 2011631F+03 • 2447088E+02 • 1194914E+03 • 2405416E+02
• 1516917E+02 • 9085707E+02 • 3058029E+02 • 4331262E-C9 • 3812854E+02

PUNCTUL 5 AL COMPLEXULUI F= • 3202589E+04

X= • 1636980E+03 • 2011618F+03 • 2447159E+02 • 1194925E+03 • 2405376E+02
• 1516883CE+02 • 9086044F+02 • 3057997E+02 • 4331636E-03 • 3812952E+02

PUNCTUL 6 AL COMPLEXULUI F= • 3202580E+04

X= • 1636975E+03 • 2011623F+03 • 2447145E+02 • 1194924E+03 • 2405375E+02
• 1516837E+C2 • 9086007F+02 • 3057994E+02 • 4331634E-03 • 3812954E+02

PUNCTUL 7 AL COMPLEXULUI F= • 3202578E+04

X# 01516257E+C2 0.308062E+C2 0.35733E+02 0.4331593E-03 0.3612338E+C2
Y# 01626962E+03 0.2011623F+03 0.2447134E+02 0.1194916E+03 0.2405399E+02

PUNCTUL 8 AL COMPLEXULUI F# 0.3202553E+C4

X# 01516892E+02 0.9055926F+C2 0.3558021L+01 0.4331527E-03 0.3812910E+02
Y# 01636948E+03 0.2011629F+03 0.2447105E+02 0.1194917E+03 0.2405407E+02

PUNCTUL 9 AL COMPLEXULUI F# 0.3202528E+C4

X# 01516892E+02 0.9055926F+C2 0.3558021L+01 0.4331393E-03 0.3812880E+02
Y# 01636952E+03 0.2011636F+C3 0.2447078E+02 0.1194916E+03 0.2405410E+02

PUNCTUL 10 AL COMPLEXULUI F# 0.3202492E+C4

X# 01516892E+02 0.9055926F+C2 0.3558021L+01 0.4331277E-03 0.3812835E+02
Y# 01636953E+03 0.2011635F+C3 0.2447051E+02 0.1194914E-03 0.2405404E+02

PUNCTUL 11 AL COMPLEXULUI F# 0.3202549E+C4

X# 01516892E+02 0.9055926F+C2 0.3558021L+01 0.4331277E-03 0.3812835E+02
Y# 01636955E+03 0.2011634F+C3 0.2447129E+02 0.1194914E-03 0.2405404E+02

PUNCTUL 12 AL COMPLEXULUI F# 0.3202543E+C4

X# 01516892E+02 0.9055920F+C2 0.3058029E+C1 0.4331470E-03 0.3812900E+02
Y# 01636956E+03 0.2011624F+C3 0.2447124E+02 0.1194916E+03 0.2405404E+02

PUNCTUL 13 AL COMPLEXULUI F# 0.3202539E+C4

X# 01516892E+02 0.9055873F+C2 0.3058029E+C1 0.4331470E-03 0.3812900E+02
Y# 01636955E+03 0.2011625F+C3 0.2447125E+02 0.1194916E+03 0.2405404E+02

PUNCTUL 14 AL COMPLEXULUI F# 0.3202513E+C4

X# 016369415E+C3 0.2011625F+C3 0.2447032E+02 0.1194916E+03 0.2405409E+02
Y# 01516928E+02 0.9055692F+C2 0.3058029E+C1 0.4331450E-03 0.3812849E+02

PUNCTUL 15 AL COMPLEXULUI $F = 0.320256CE+04$.

$X = 0.1626954E+03$ $0.2211524F+C3$ $0.2447133E+02$ $0.1194921E+03$ $0.2405392E+02$
 $0.1516397E+02$ $0.9325935F+C2$ $0.3058017E+02$ $0.4331542E-03$ $0.3812914E+02$

PUNCTUL 16 AL COMPLEXULUI $F = 0.3202487E+04$.

$X = 0.1636923E+03$ $0.2011635F+C3$ $0.2447073E+02$ $0.11949303E+03$ $0.2405422E+02$
 $0.15163924E+02$ $0.9055672F+C2$ $0.3058044E+02$ $0.4331247E-03$ $0.381263CE+02$

PUNCTUL 17 AL COMPLEXULUI $F = 0.320256CE+04$.

$X = 0.1636556E+03$ $0.2011624F+C3$ $0.2447135E+02$ $0.1194922E+03$ $0.2405386E+02$
 $0.1516354E+02$ $0.90353247F+C2$ $0.3058033E+02$ $0.4331533E-03$ $0.3812324E+02$

PUNCTUL 18 AL COMPLEXULUI $F = 0.320256CE+04$.

$X = 0.1636359E+03$ $0.2011621F+C3$ $0.2447141E+02$ $0.1194925E+03$ $0.2405338E+02$
 $0.1516337E+02$ $0.9035372F+C2$ $0.3058033E+02$ $0.4331617E-03$ $0.38123918E+02$

PUNCTUL 19 AL COMPLEXULUI $F = 0.320252CE+04$.

$X = 0.1636945E+03$ $0.2011629F+C3$ $0.2447104E+02$ $0.1194912E+03$ $0.2405412E+02$
 $0.15169C3E+C2$ $0.9035314F+C2$ $0.305804CE+02$ $0.4331382E-03$ $0.3812874E+02$

PUNCTUL 20 AL COMPLEXULUI $F = 0.3202516E+04$.

$X = 0.1636945E+03$ $0.2011628E+C3$ $0.2447137E+02$ $0.1194915E+03$ $0.2405410E+02$
 $0.1516335E+C2$ $0.9035325F+C2$ $0.3058033E+02$ $0.4331334E-03$ $0.3812874E+02$

PUNCTUL 21 AL COMPLEXULUI $F = 0.3202575E+04$.

$X = 0.1626973E+03$ $0.2011626F+C3$ $0.2447137E+02$ $0.1194924E+03$ $0.2405376E+02$
 $0.1516335E+02$ $0.9035325F+C2$ $0.3057971E+02$ $0.4331569E-03$ $0.3812874E+02$

PUNCTUL 22 AL COMPLEXULUI $F = 0.3202559E+04$.

$x =$ •1636963E+03 •2011626E+03 •2447127E+02 •1194921E+03 •2465390E+02
 •1516930E+02 •9085420E+02 •3058006E+02 •4331518E-03 •3812914E+02

PUNCTUL 23 AL COMPLEXULUI $F =$ •3252586E+04

$x =$ •1636973E+03 •2011619E+03 •2447156E+02 •1194924E+03 •2465379E+02
 •1516933E+02 •9086037E+02 •3057996E+02 •4331636E-03 •3812950E+02

PUNCTUL 24 AL COMPLEXULUI $F =$ •3252572E+04

$x =$ •1636971E+03 •2011624F+03 •2447137E+02 •1194921E+03 •2465380E+02
 •1516922E+02 •90856F+02 •3057987E+02 •4331563E-03 •3812930E+02

PUNCTUL 25 AL COMPLEXULUI $F =$ •3252574E+04

$x =$ •1636971E+03 •2011623F+03 •2447142E+02 •1194924E+03 •2465284E+02
 •1516933E+02 •908565F+02 •3057996E+02 •4331562E-03 •3812920E+02

PUNCTUL 26 AL COMPLEXULUI $F =$ •3252504E+04

$x =$ •1636935E+03 •2011635F+03 •2447082E+02 •1194911E+03 •2465417E+02
 •1516923E+02 •9085732E+02 •3058035E+02 •4331324E-03 •3812345E-02

PUNCTUL 27 AL COMPLEXULUI $F =$ •3252569E+04

$x =$ •1636968E+03 •2011623F+03 •2447138E+02 •1194923E+03 •2465384E+02
 •1516897E+02 •9085953F+02 •3058004E+02 •4331559E-03 •3812931E+02

PUNCTUL 28 AL COMPLEXULUI $F =$ •3252546E+04

$x =$ •1636958E+03 •2011623F+03 •2447125E+02 •1194918E+03 •2465402E+02
 •1516824E+02 •9035937F+02 •3058022E+02 •4331460E-03 •3812904E+02

PUNCTUL 29 AL COMPLEXULUI $F =$ •3252497E+04

$x =$ $1636933E+03$ $2011635E+03$ $244/382E+02$ $1194029E+03$ $2405417E+02$
 $1516921E+02$ $9085739E+02$ $356333E+02$ $4331293E-03$ $3812840E+02$

PUNCTU 30 AL COMPLEXULUI F = - 32.2534E+04.

$x =$ $1636974E+03$ $2011622E+03$ $2447145E+02$ $1194928E+03$ $2405320E+02$
 $15169387E+02$ $9365023E+02$ $357974E+02$ $4331572E-C3$ $3812947E+02$

STRUCTURELUI

$r_1 = 1712$ $R_1 = 5154$ $r_1 = 3865$
 $r_2 = 32.203E+04$

$\cdot 153.073E+03$ $\cdot 2011708E+03$ $\cdot 244674E+02$ $\cdot 119484E+03$

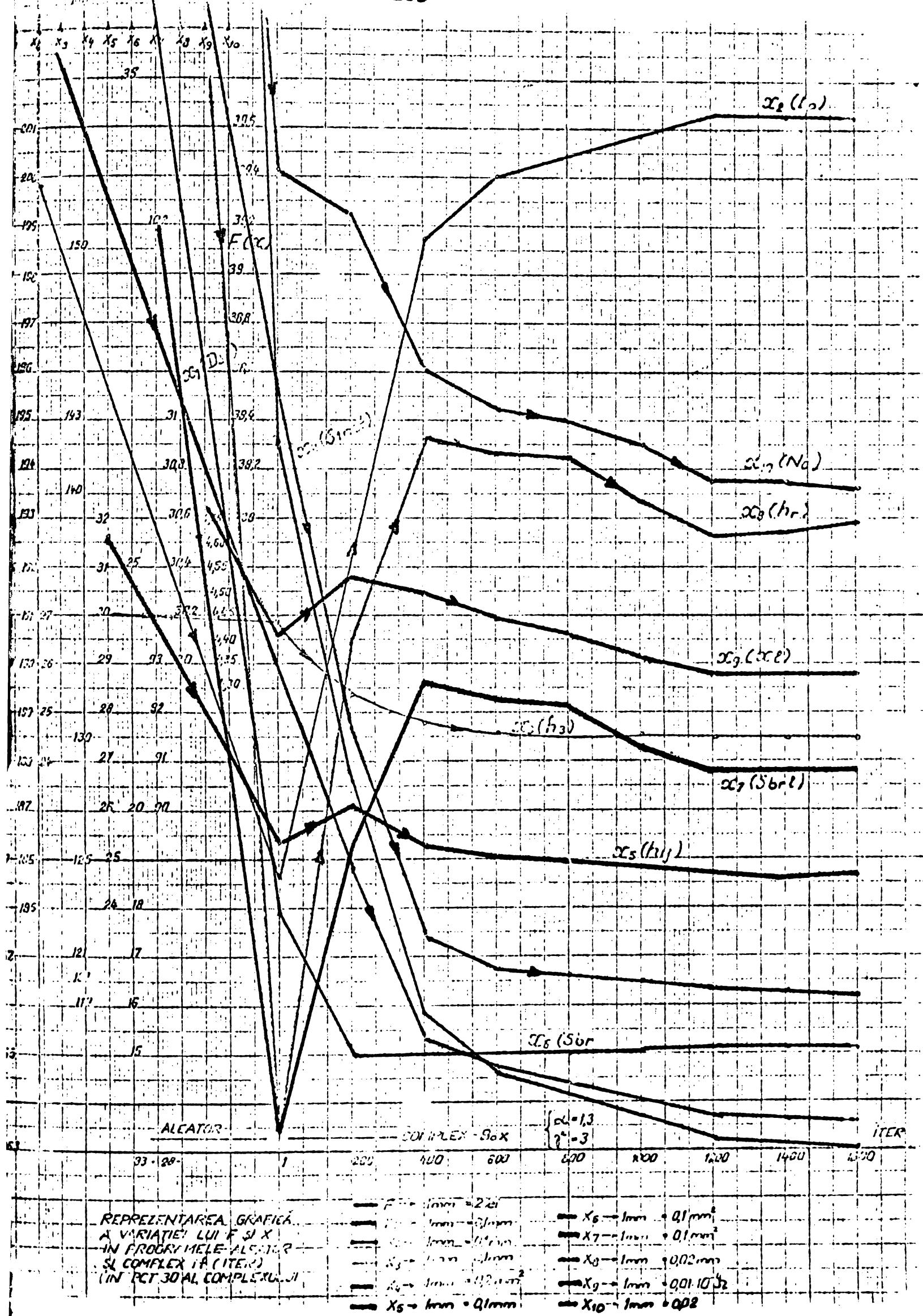
$\cdot 908419E+02$ $\cdot 305324E+02$ $\cdot 4323/41.-03$

$\pm 120 =$ 1642243 $X1 = 452420$ $R2175 = 475223$ $X1S = 3990943$ $X21 = 7363679$
 $\pm 116 =$ 5925746 $R217 = 3142162$ $FE = 507.37$ $PAL = 514.95$ $INI = 11.23$
 $\pm 110 =$ 62.20 $R3.7L = 92.52$ $RIV = 152.92$ $L1A = 1.1537365$ $SN = 0263569$
 $\pm 106 =$ 3.08333532 $X2N = 1.1212240$ $Z1.0 = 5.524268$ $L21 = 31.775$ $L21A = 31.133$
 $\pm 102 =$ 6.0356 $117 = 36.7256$ $FC.1 = 6.4.192$ $PTST = 2097.912$ $BETA = 156566CE-02$
 $\pm 98 =$ 0776454 $STCNS = 5.591.24$ $C.0.105$ $TETACJ-FE = 31.328$ $SV = 8873$
 $\pm 94 =$ 01078 $RC = 01.543$ $TE1A.GA = 36.0.372$ $TETACJ = 7.0.0010$
 $\pm 90 =$ $VAL321E$ $CS1.7.711LSR$ \cdot \cdot
 $\pm 86 =$ 12.02172 $SE = 83.0.749$ $S3 = 3.0.252$ $SE = 0.5.534$
 $\pm 82 =$ 0.2376 $CS = 0.234$ $CS = 0.000$ $CS = 0.000$
 $\pm 78 =$ 0.2376 $CS = 0.234$ $CS = 0.000$ $CS = 0.000$
 $\pm 74 =$ 0.2376 $CS = 0.234$ $CS = 0.000$ $CS = 0.000$
 $\pm 70 =$ 0.2376 $CS = 0.234$ $CS = 0.000$ $CS = 0.000$
 $\pm 66 =$ 0.2376 $CS = 0.234$ $CS = 0.000$ $CS = 0.000$
 $\pm 62 =$ 0.2376 $CS = 0.234$ $CS = 0.000$ $CS = 0.000$
 $\pm 58 =$ 0.2376 $CS = 0.234$ $CS = 0.000$ $CS = 0.000$
 $\pm 54 =$ 0.2376 $CS = 0.234$ $CS = 0.000$ $CS = 0.000$
 $\pm 50 =$ 0.2376 $CS = 0.234$ $CS = 0.000$ $CS = 0.000$
 $\pm 46 =$ 0.2376 $CS = 0.234$ $CS = 0.000$ $CS = 0.000$
 $\pm 42 =$ 0.2376 $CS = 0.234$ $CS = 0.000$ $CS = 0.000$
 $\pm 38 =$ 0.2376 $CS = 0.234$ $CS = 0.000$ $CS = 0.000$
 $\pm 34 =$ 0.2376 $CS = 0.234$ $CS = 0.000$ $CS = 0.000$
 $\pm 30 =$ 0.2376 $CS = 0.234$ $CS = 0.000$ $CS = 0.000$
 $\pm 26 =$ 0.2376 $CS = 0.234$ $CS = 0.000$ $CS = 0.000$
 $\pm 22 =$ 0.2376 $CS = 0.234$ $CS = 0.000$ $CS = 0.000$
 $\pm 18 =$ 0.2376 $CS = 0.234$ $CS = 0.000$ $CS = 0.000$
 $\pm 14 =$ 0.2376 $CS = 0.234$ $CS = 0.000$ $CS = 0.000$
 $\pm 10 =$ 0.2376 $CS = 0.234$ $CS = 0.000$ $CS = 0.000$
 $\pm 6 =$ 0.2376 $CS = 0.234$ $CS = 0.000$ $CS = 0.000$
 $\pm 2 =$ 0.2376 $CS = 0.234$ $CS = 0.000$ $CS = 0.000$
 $0 =$ 0.2376 $CS = 0.234$ $CS = 0.000$ $CS = 0.000$

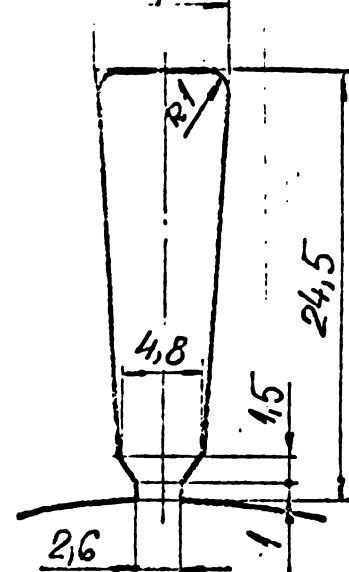
$CS = 12.0314$ $CS = 0.110$ $CS = 0.053$ $BRM = 4.0714$
 $CS = 0.12 = 1.038$ $CS = 0.134$ $CS = 0.052$ $HS2 = 1.05.0$
 $CS = 0.12 = 0.125$ $CS = 0.134$ $CS = 0.052$ $HR1 = 0.05.0$
 $CS = 0.12 = 0.125$ $CS = 0.134$ $CS = 0.052$ $HF = 0.5.0$
 $CS = 0.12 = 0.125$ $CS = 0.134$ $CS = 0.052$ $HL = 7.0116$

TABEL CU VARIATIA LUI Y SI F(Y) (in pct-ul 30 al complexului)

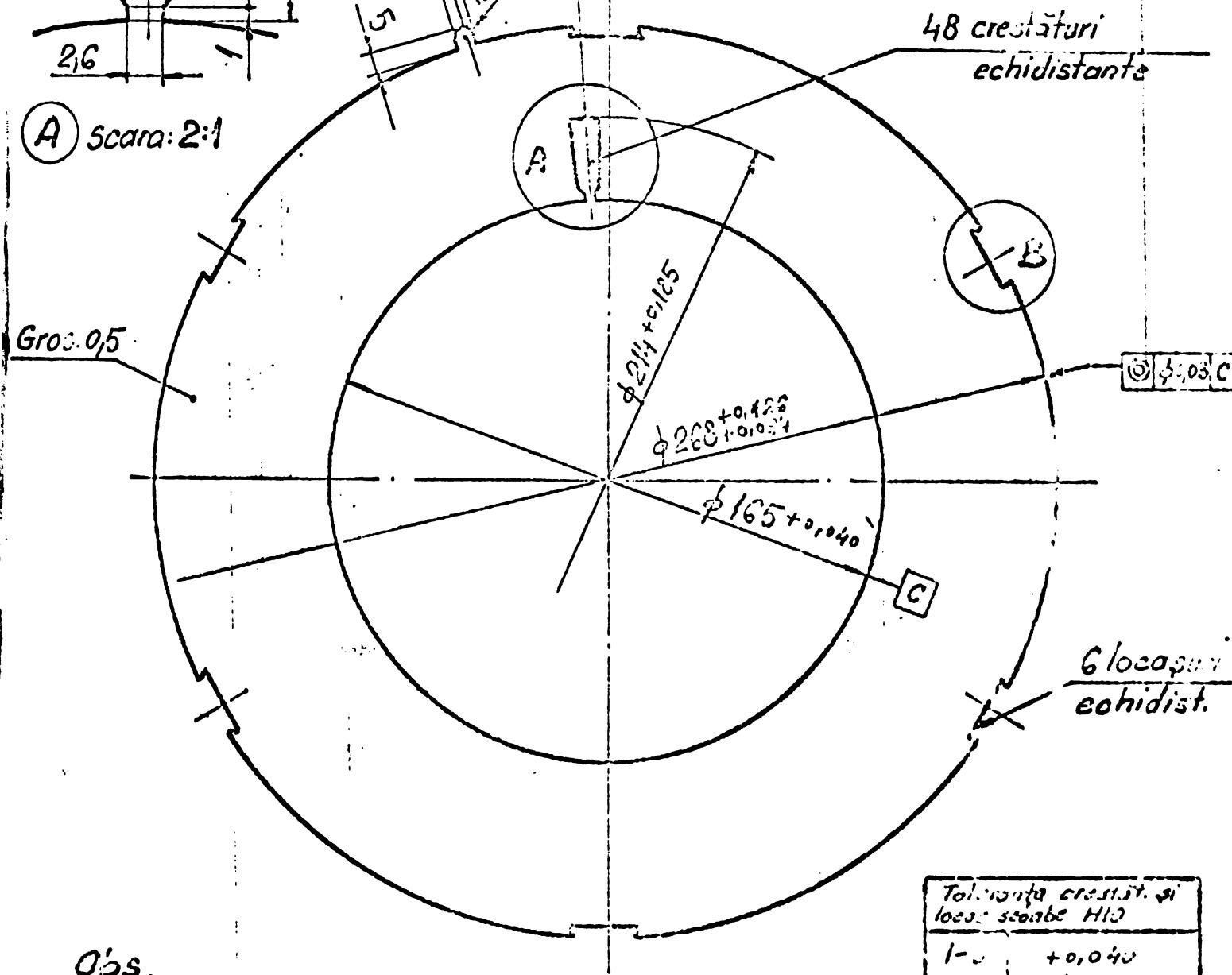
Algorithm Complex - Box



1/1



(A) Scara: 2:1



O.S.

-simbolul crestături: 149

Toleranță crestături și locaș scrisă H/0	
1-6	+0,040
3-6	+0,043
6-10	+0,05
18-30	+0,084

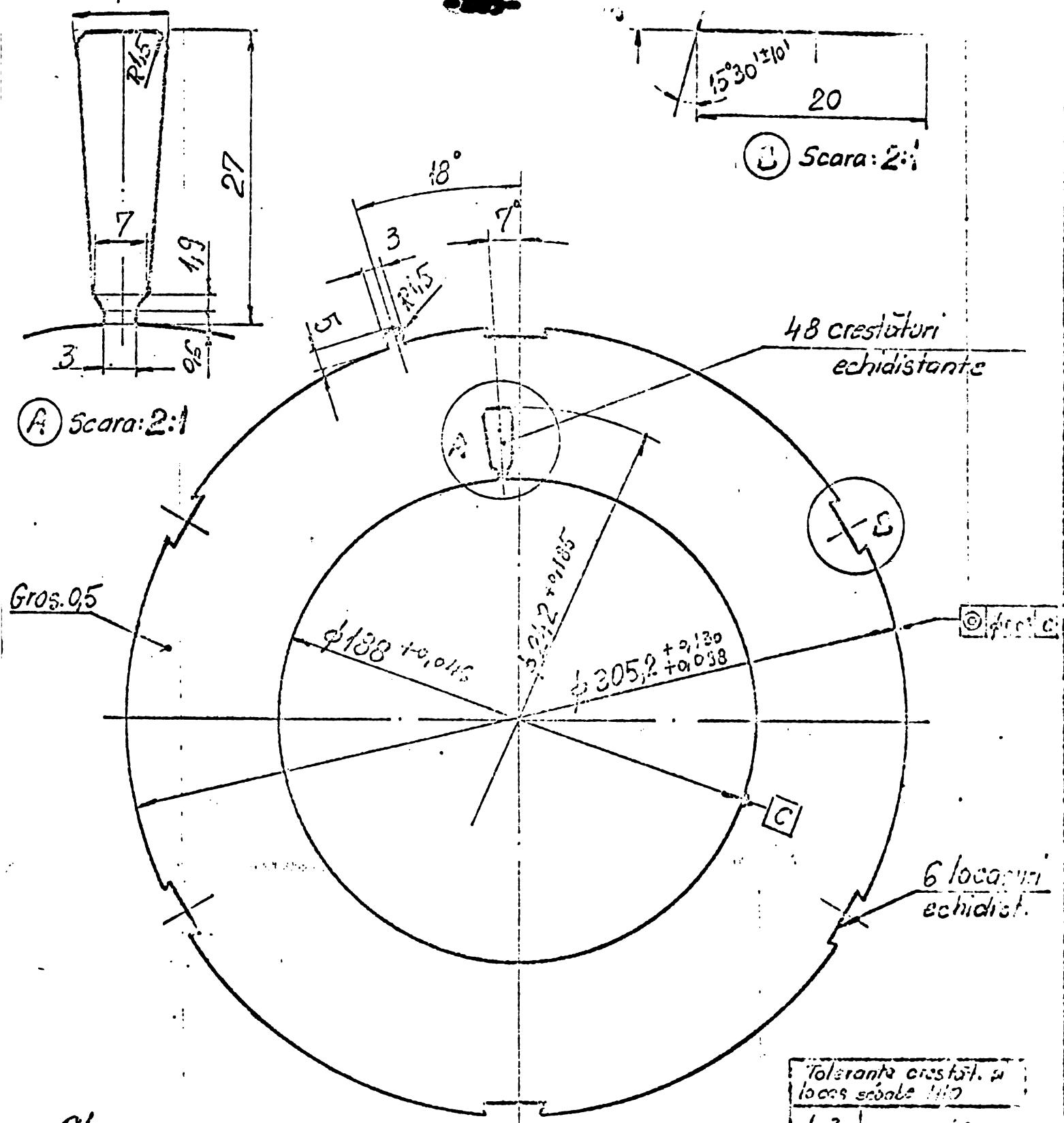
Proiectat	ing. Tatu Gh.	Scara: 1:10	Pl.nr.
Desenat	Bahn S.	Scara: 1:10	
Verificat	ing. Popescu I.	Scara: 1:10	
Contr. STAS	ing. Popescu I.	Scara: 1:10	
Aprobat	ing. Simionescu	Scara: 1:10	

P.71526

ELECTROMOTOR
REVIZIONARScara:
1:10 2:1

TOL. SIETO:

M7-100L-16,5x1500GT optimizat pentru
mijloace de transport cu dimensiuni



O.S.

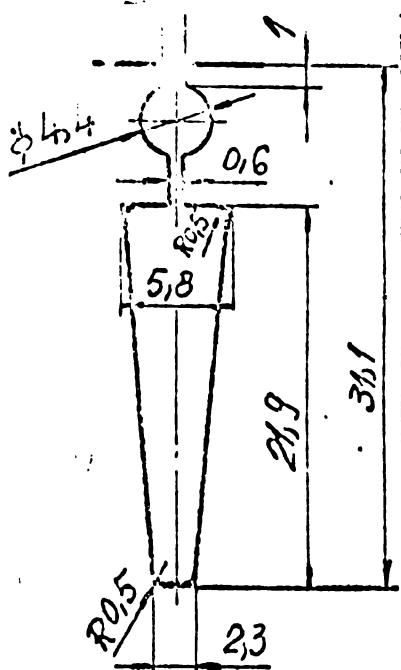
-simbolul creștăturii: 220.

Toleranțe creștăt. în locuri scăzute 1/10	
1-3	+0,040
3-5	+0,043
6-10	+0,053
18-30	+0,081

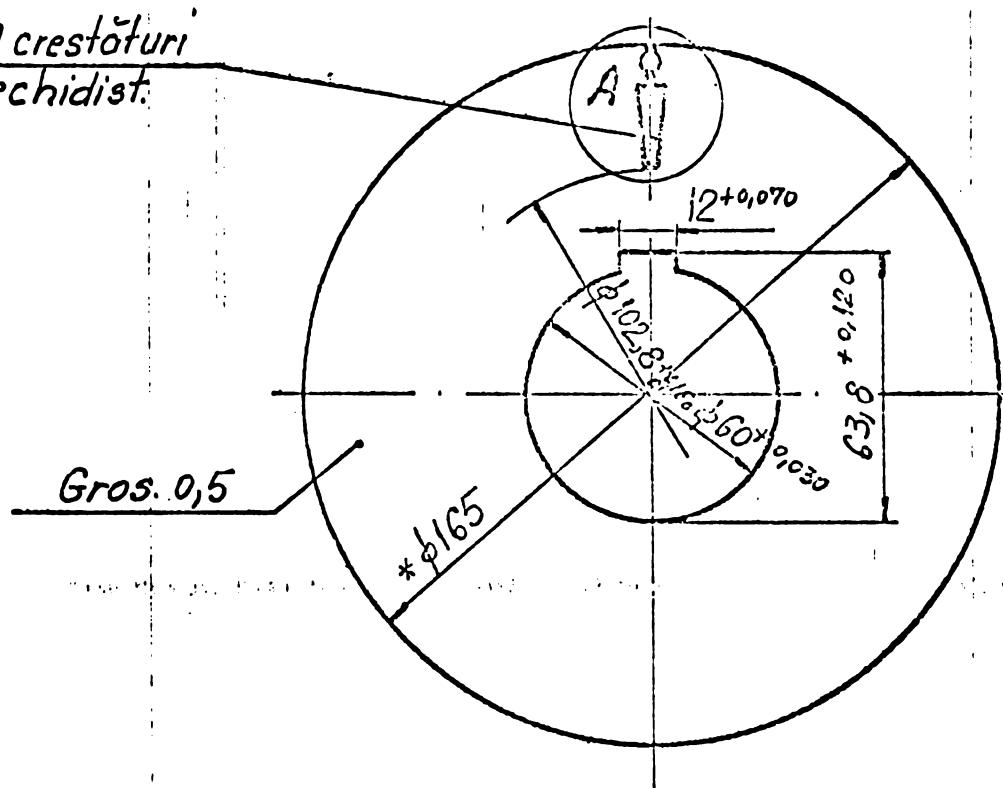
Proiectat	Copie	Scrisă și însemnată	P 37130	7.1.11.
Din proiect	Boris S.	mar. 10.07.2011		
Verificat	... Rădulescu T.	scris în același operec,		
Conț. Sursă	... Rădulescu T.	gros. ind. 0,02		
Aprobat	... Rădulescu T.	verificat 0,02		
ELECTROMOTOR TIMIŞOARA		Scara: 1:2; 2:1 D.R. 12. N. 95	TELA STATOR ASID-200-18,5x1500 CT	

-206-

Toleranță crest. rotor' H10	
0,6-3	+0,040
3-6	+0,040
21,9	+0,084
31,1	+0,100



40 crestături
echidist.



A Scara: 2:1

O&S.

- Simbolul crestături 107
- Cota *φ165 rezultă din decupare.

Proiectat	ing. Tatu Gh.	Crt	Banda silic. lom. la	Pl. nr.
Desenat	Bohn Susanna	Bala	rec. p10 = 2,5 w/kg	
Verificat	ing. Popescu Gheorghe	+	3,25 min. = 1,55 f	
Contr. STAS	ing. Popescu Gheorghe	T	izolat pe o parte	
Aprobat	ing. Giuribescu A.	M	Hasta nr. 7: 10.11.96	

P71525

Inlocuieste desen nr.

Nr. inventar

ELECTROMOTOR
TIMIȘOARA

Scara:

1:20
1:10
1:5
1:2
1:1

TOLA ROTOR

1.SID-100L - 18,5 x 1500 CT optimizat printr-
o programare nelineară

- DIMENSIUNILE FINALE sunt c...

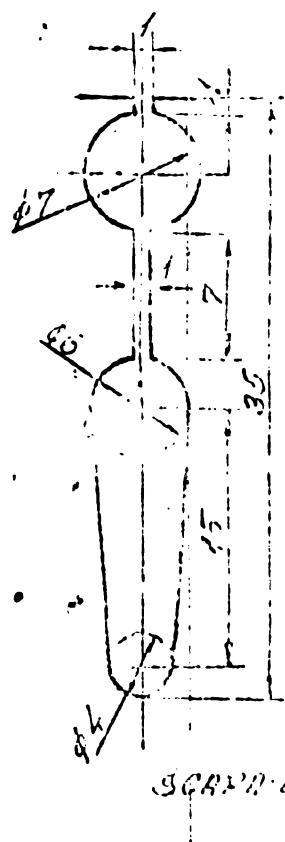
SINT CELE DEDE DESEN.

în COTA ϕ 188 REZULTA DIN DECUPARE.

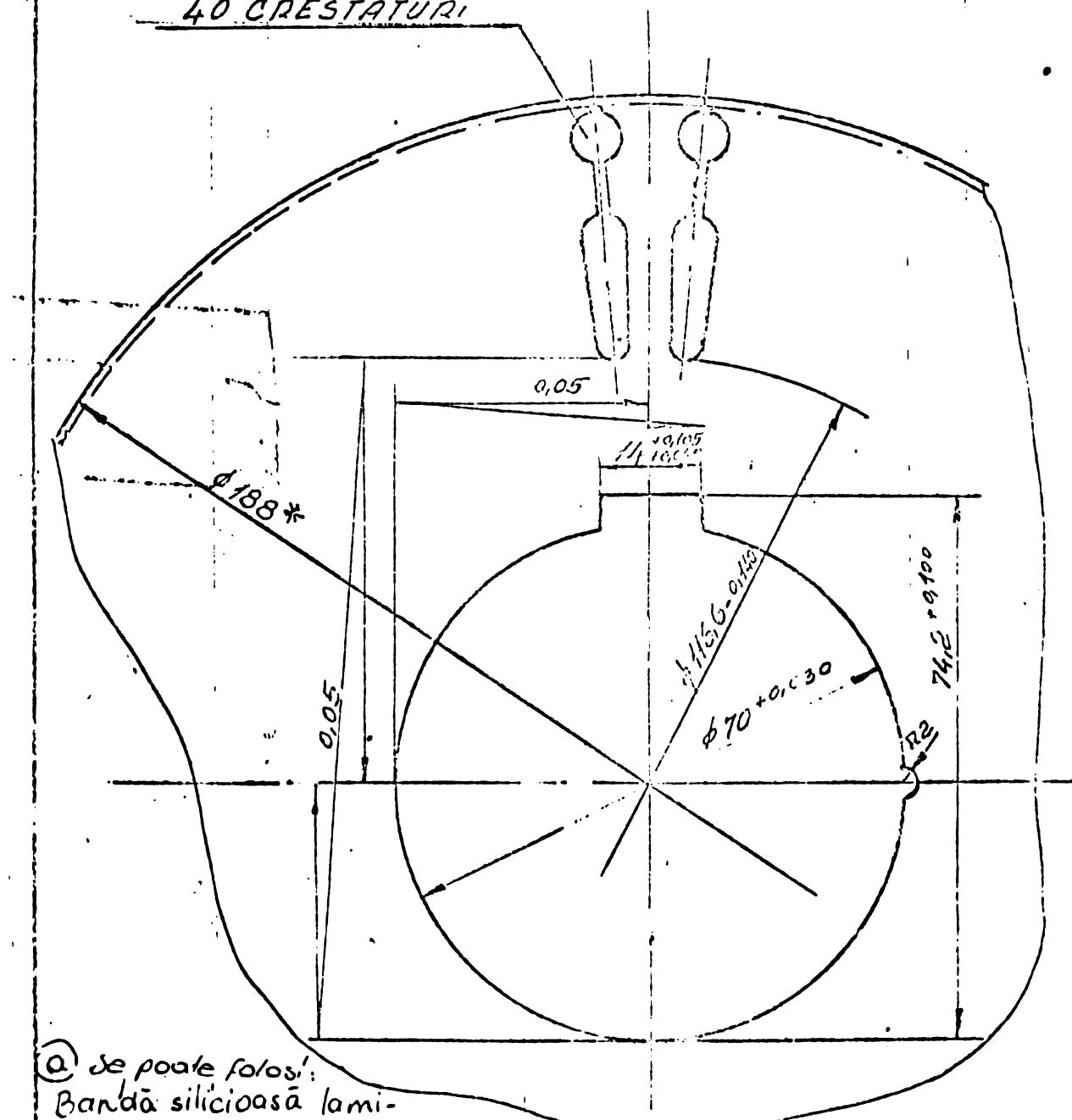
- PT. BAVURI MAI MARI CA 0,1 SE PREVEDE
DECUPARE.

- SIMBOLUL CRESTATURII "143"

	11.5
1	+0,010
4-6	+0,048
7	+0,059
15	+0,070
35	+0,100



40 CRESTATURI



TEHNICOLOG:
18-12-64
210:

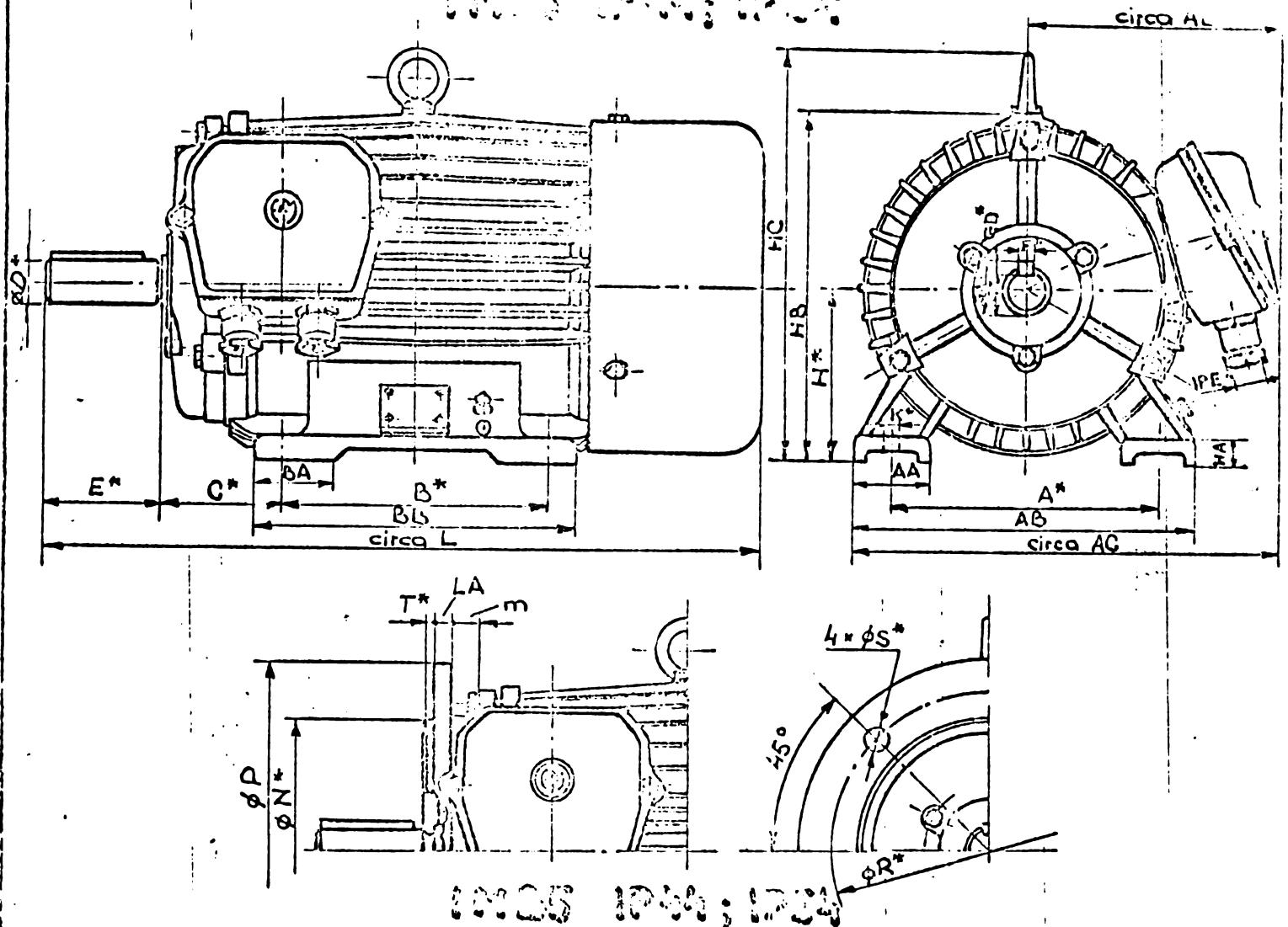
(a) se poate folosi:
Bandă silicioasă lami-
nată la rece $0,5 \times 310$ 2,8 W/kg
izolată pe o parte cu stăbolit 10 gros 4-8; și
(sau izolație echivalentă)

a 1 FS 4191 9.01.63 Saboilescu

Ing. Morară 14/12/64 Tabla silicioasă C2-2,8
Dekor 07.12.64 C140V175.0
Ing. Sucuroanu 07.12.64 STAS 07.12.64
Ing. Constantin 07.12.64
Ing. Dumitrescu 07.12.64

P 63546

ASID 200-S/4 pt.



Tip motor	A*	AA	AB	AC	AD	B*	BA	BB	C*	D*	E*	F*	G*	GA*	GD*	H*	HA	HB	HC	K*	L	IP*
83-160M	254	70	324	417	255	210	75	260	108	42	110	12	37,1	45,1	6	10	24,5	319,5	312	14	6,2	21
83-160L	254	70	324	417	255	254	75	304	105	42	110	12	37,1	45,1	8	10	24,5	319,5	372	14	6,0	21
83-180M	279	70	349	456,5	282	241	75	300	121	48	110	14	42,5	51,5	9	130	15	354	403	14	6,42	29
ASIM80L	279	70	349	456,5	282	279	75	333	121	48	110	14	42,5	51,5	9	180	25	354	403	14	6,30	29
83-200L	318	75	393	480,5	284	305	75	360	133	55	110	16	48,6	53,8	10	200	30	397	457	16	7,30	36
83-225S	356	85	436	495	277	286	62	341	119	60	140	18	53	64	11	225	33,5	420,5	482	19	792	36
83-225M2	356	85	436	495	277	311	82	366	149	55	110	16	49	59	10	225	33,5	420,5	482	19	800	36
83-245M	356	85	436	495	277	311	82	366	119	60	140	18	53	64	11	225	33,5	420,5	482	19	630	36
ASID-200S	318	75	393	480,5	284	228	75	283	133	48	110	14	42,5	51,5	9	200	30	397	457	18	680	36

Tip motor	N*	P	R*	S*	T*	LA	m
83-160M	250	350	300	18	5	13	32
83-160L	250	350	300	18	5	13	32
83-180M	250	350	300	18	5	13	49
83-160 L	250	350	300	18	5	13	49
83-200L	300	400	350	18	5	15	43
83-225S	350	450	400	3x19	5	16	42
83-225MS	350	450	400	16x19	5	16	42
83-225M4	350	450	400	5x19	5	16	42

în afară de cotele de montaj (*) dimensiunile sunt aproximative.

Obs. Motoarele sunt fabricate în baza următoarelor norme:

STAS 1893 - 72 Conditii generale VDE 0530

STAS 2755/1-74 Dimensiuni de montaj DIN 42673, 42677

STAS 954.11-74 Corelare putere cu dimens. de montaj DIN 42673, 42677

STAS 1754 - 70 Permitele electrici

STAS 3993/1-74 Forme constructive DIN 42950

STAS 623 - 71 Tipuri și protecție IEC 10060

FIGA DE CALCUL NR. 476 Tip motor: ASID-180L-16,5x1500CIR optimizat prin metoda de programare neliniara

DIMENSIUNI GEOMETRICE

ROTOR

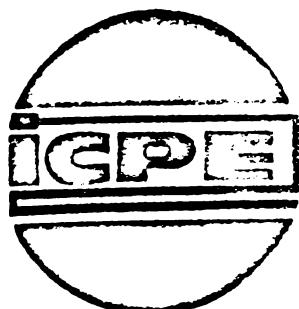
D_r	D_t	\angle	z_s	Simbol/sectie crest.	de	d_i	ρ	z_r	Simbol/afit
265	165	200	48	143	128	164	60	200	40
12,5 kW	500	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	1460	89%	0,84	325 mm. - 1597

CARACTERISTICI TEHNICHE

Putere	Tur. sincron.	Tur. nominal	Random	cos ϕ	Gmot. = 150 kN
12,5 kW	500	50 Hz	60 Hz	0,84	325 mm. - 1597

BAT. B.C. E.O. 1,15/1,15

Temperatura	Current	Spire/circ.	Posit. spire/circ.	Spire/circ.	Rezist. spire/circ.	Factor de rezistență la urmărire	Gravitație	Numărul tururi/oră	Secție	Secție	Data	Calculator	Verificare
70	13,30	652,077	16105x211	38	4-12	2	1	91511,92	0,72	736955	11,6	4	5,0770



M. I. C. M. – INSTITUTUL DE CERCETĂRI
PENTRU INDUSTRIA ELECTROTEHNICĂ

НАУЧНО - ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
FORSCHUNGSIINSTITUT FÜR DIE ELEKTROTECHNISCHE INDUSTRIE
INSTITUT DE RECHERCHE POUR L'INDUSTRIE ELECTROTECHNIQUE
RESEARCH INSTITUTE FOR THE ELECTROTECHNICAL INDUSTRY

Bd. T. Vladimirescu Nr. 45–47; 76134; Sector 6; BUCUREŞTI 7000; Tel.: 314100; Telex: 10.486

Secția (Laboratorul)
Cercetare calitate

Nr. buletin 754 Data 25.06.079

BULETIN DE ÎNCERCARE

1. TEMA încercări de tip în vederea stabilirii performanțelor

Nr. temă 4280

2. PRODUSUL Motor asincron trifazat în scurtcircuit în dublă colivie optimizat prin metode de programare neliniște

Felul produsului prototip Nr. buc. 1

Nr. fabricației 1

Anul fabricației 1979

Fabricat de Electromotor Timișoara

3. SOLICITANT Electromotor Timisoara

prin adresa (comanda) Nr. 16195/23.06.1979

4. INCERCARILE

executate de :

de la :

Semnătura :

ing. M. Tătuleanu

ICPE

M. Tătuleanu

ing. Gh. Miclea

EMT

G. Miclea

sing. Gh. Földes

EMT

5. BULETINUL

verificat de :

/ ing. A. Albu

ICPE

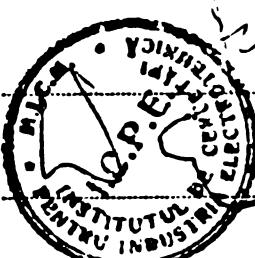
A. Albu

aprobat de șef secție (laborator)

ing. O. Papa Gheorghe

aprobat de director

Dr.ing. Fl.T.Tănăsescu



Buletinul conține 10 file

NOTA : Este interzis a se reproduce extrase din prezentul buletin

-212-

INSTITUTUL DE CERCETARE IN
INDUSTRIA ELECTROTEHNICA

1. DATELE TEHNICE ALĂ PRODUSULUI :

Puterea nominală	18,5kW
Turația sinononă	1500 r/m
Tensiunea nominală	380V
Factor de putere	0,84
Randament	89
I _p /I _n	5,5
M _p /M _n	2,4
Grad de protecție	IP 44
clasă izolație	B
Nivel zgomot	85 dB(A)
Nivel vibrații	2,8 m/s
Factor de serviciu	1

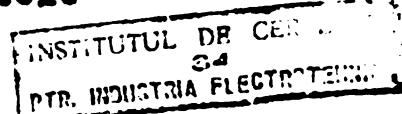
2. NORME CARE AU STAT LA Baza INCERCARILOR :

STAS 1893-78 și NID ; C.S. 3-66

3. REZULTATELE INCERCARILOR IN ANEXA : 1

4. OBSERVATORII IN ANEXA : 1+2

5. CONCLuziON : Corespunzînd la incercări produsele; motor asincron trifazat cu rotorul în scurtcircuit în dublă colivie"cf. standardelor de la pot. 2, se comunică rezultatele



**INSTITUTUL DE CERCETARI DE LA IARU
INDUSTRIA ELECTROTEHNICĂ**

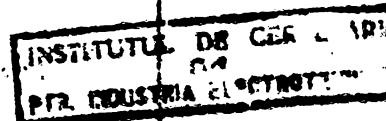
Nr. bul. nr. :
Anexa Nr. 1

Nr. art.	Denumirea încercării	Condiția de lucru conform STAS/NI	Metoda de încercare conform STAS/NI	Rezultatul încercării (a se vedea și anexele)
1.	Verificarea montajului general și a asamblării corecte a tuturor subansamblurilor.		STAS 7246/l-74 pet.5	coresponde
2.	Măsurarea rezistenței de izolație a înfășurărilor față de corpul maginii și a izolației între înfășurări	STAS 1893-78 6.3.1	STAS 7246/3-74	coresponde
3.	Măsurarea în-curent continuu a rezistenței electrice a tuturor înfășurărilor în stare rece a mașinii.		STAS 7246/2-74	Anexa 3 Tabel 1
4.	Determinarea pierderilor în fier și a celor mecanice.		STAS 7246/5-74	Anexele 3 și 5.
5.	Încercarea de scurtcircuit		STAS 7246/6-74	Anexa 3
6.	Încercarea de încălzire	STAS 1893-78	STAS 7246/8-74 5.	coresponde Anexele 2 și 4
7.	Verificarea valorii garantate a randamentului și a factorului de putere		STAS 7246/9-74	coresponde Anexele 2, 4 și 6.
8.	Încercarea la tensiune mărită a izolației între înfășurări și față de masa mașinii	STAS 1893-78 6.1.	STAS 7246/3-74	coresponde
9.	Încercarea la suprasarcină de scurtă durată	STAS 1893-78 7.1.	STAS 7246/7-74	Coresponde Anexa 2
10.	Încercarea la depășirea momentană a cuplului nominal.	STAS 1893-78 7.2.1.	STAS 7246/7-7	coresponde
11.	Încercarea la supratensiune.	STAS 1893-78 7.7.	STAS 7246/7-7	Coresponde <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">INSTITUTUL DE CERCETARI P.T.R. INDUSTRIA ELECTROTEHNICĂ</div>

**INSTITUTUL DE CERCETARE
INDUSTRIA ELECTROTEHNICĂ**

Nr. de lucru :
Anexa Nr.

Denumirea încercării	Condiția de conformitate STAS/NI	Metoda de încercare conform STAS/NI	Rezultatul încercării (a se vedea și anexele)
Determinarea rapoartelor Lp/In și Mp/Mn	- STAS 1893-78 7.3.	STAS 7246/Io-74	Coresponde Anexa 2 și 5 Tabel 6.
Determinarea rapoartelor Mmax/Mn și Mmin./Mn.		STAS 7246/Io-74	Coresponde Anexa 2 și 7
Încercarea izolației între spire	STAS 1893-78 6.2.	STAS 7246/Io-74	Coresponde Anexa 2
Măsurarea nivelului de zgomot	STAS 8274-74	STAS 7301-74	Coresponde
Măsurarea nivelului de vibrații	STAS 8681-78	STAS 7536-71	Coresponde
Verificarea gradului de pro- tecție constructivă	STAS 625-70	STAS 6588-62	Coresponde
Verificarea acoperirilor de protecție		STAS 8009-67	Coresponde



GM

INSTITUTUL DE CERCETARE PENTRU
INDUSTRIA ELECTROTEHNICA

Nr. buletin:
Anexa Nr.2

INCERCAREA Nr. 6

Motorul a fost încărcat la puterea nominală, în serviciul nominal tip. După atingerea regimului termic stabilizat s-a determinat încălzirea înfășurărilor prin metoda variației rezistenței. S-a obținut :

$$\Delta\theta = 73,1 \quad (^{\circ}\text{C}) \quad \text{admis :} \quad 80 \quad (^{\circ}\text{C})$$

INCERCAREA Nr. 7

Pentru magina în stare caldă au fost ridicato caracteristicile de funcționare.

La puterea utilă nominală

$$\frac{\text{Rand}}{\text{R}} = 89,81 \% \quad \text{impus :} \quad 89,0 \% \quad \text{admis :} \quad \%$$

$$\cos\phi = 0,8301 \quad \text{impus :} \quad 0,84 \quad \text{admis :} \quad 0,8133$$

INCERCAREA Nr. 12

Din încercarea motorului asincron în regim de scurt-circuit, cu rotorul blocat contra $U = 380$ V, a rezultat :

$$\frac{M_p}{M_n} = 2,56 \quad \text{impus :} \quad 2,4 \quad \text{admis :}$$

$$\frac{I_p}{I_n} = 5,38 \quad \text{impus :} \quad 5,5 \quad \text{admis :}$$



INSTITUTUL DE CERCETARE PENTRU
INDUSTRIE MECANICALE

Nr. buletin:
Anexa Nr.2

INCERCAREA Nr. 12

Cu ajutorul caracteristicii mecanice a motorului pentru
 $U = 380$ V, s-a determinat :

$$\frac{M_{\max.}}{M_n} = 2,56$$

impus : neimpus

admis :

$$\frac{M_{\min.}}{M_n} = 1,42$$

admis : neimpus

INCERCAREA Nr. 15

Valoarea maxima a presiunii acustice măsurată la 1 m, datorită carcasei maginii conform anexei 8 a fost de :

$$Z = 77 \text{ dB(A)}$$

impus : 85

admis :

INCERCAREA Nr. 16

Valoarea maximă a vitezei efective de vibrație a carcsei maginii conform anexei 8 a fost de :

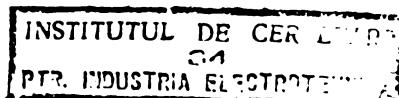
$$\begin{array}{ll} V = & 1,45 \text{ mm/s} \\ & 0,95 \\ & 1,20 \\ & 1,25 \end{array}$$

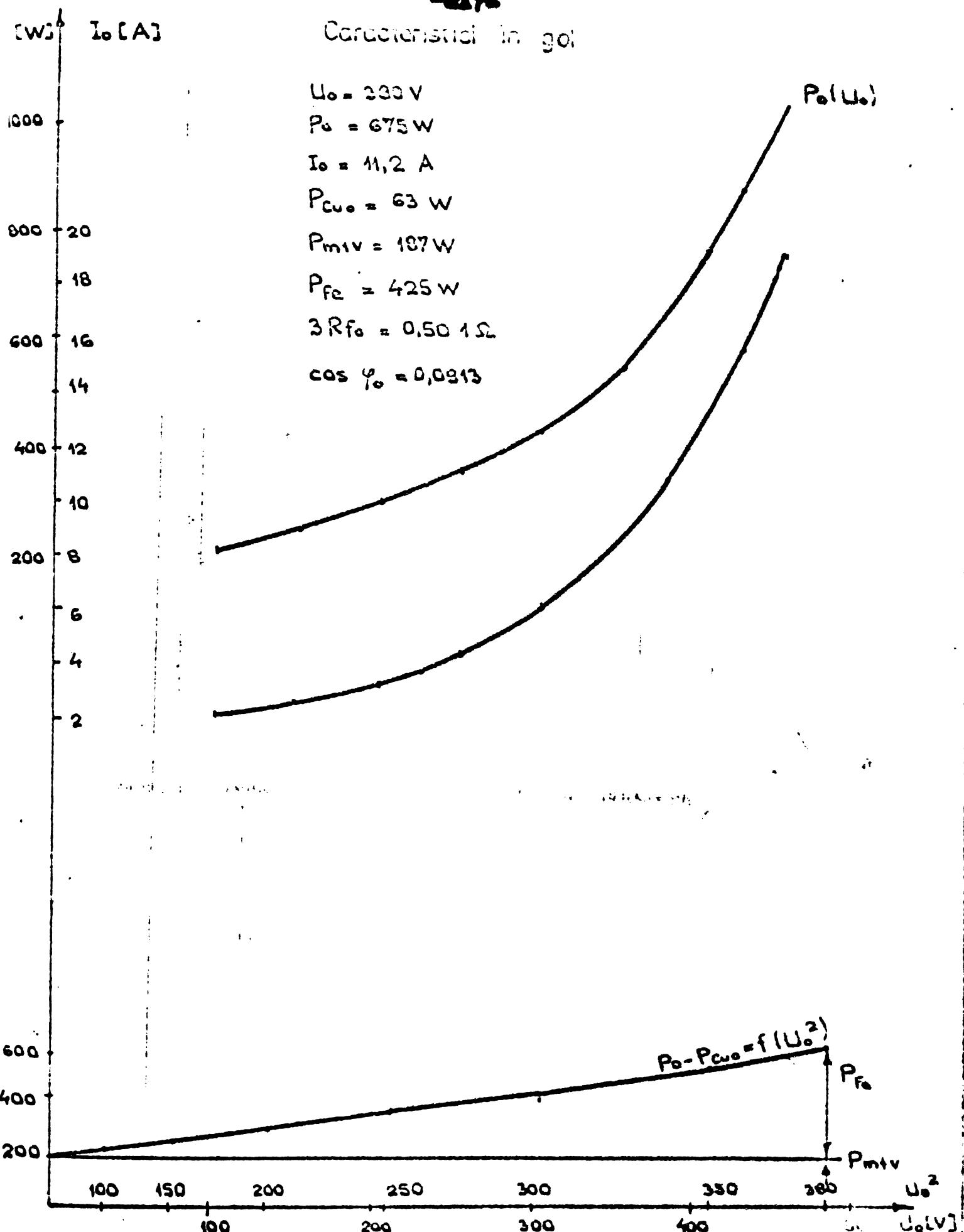
impus : 2,8

admis :

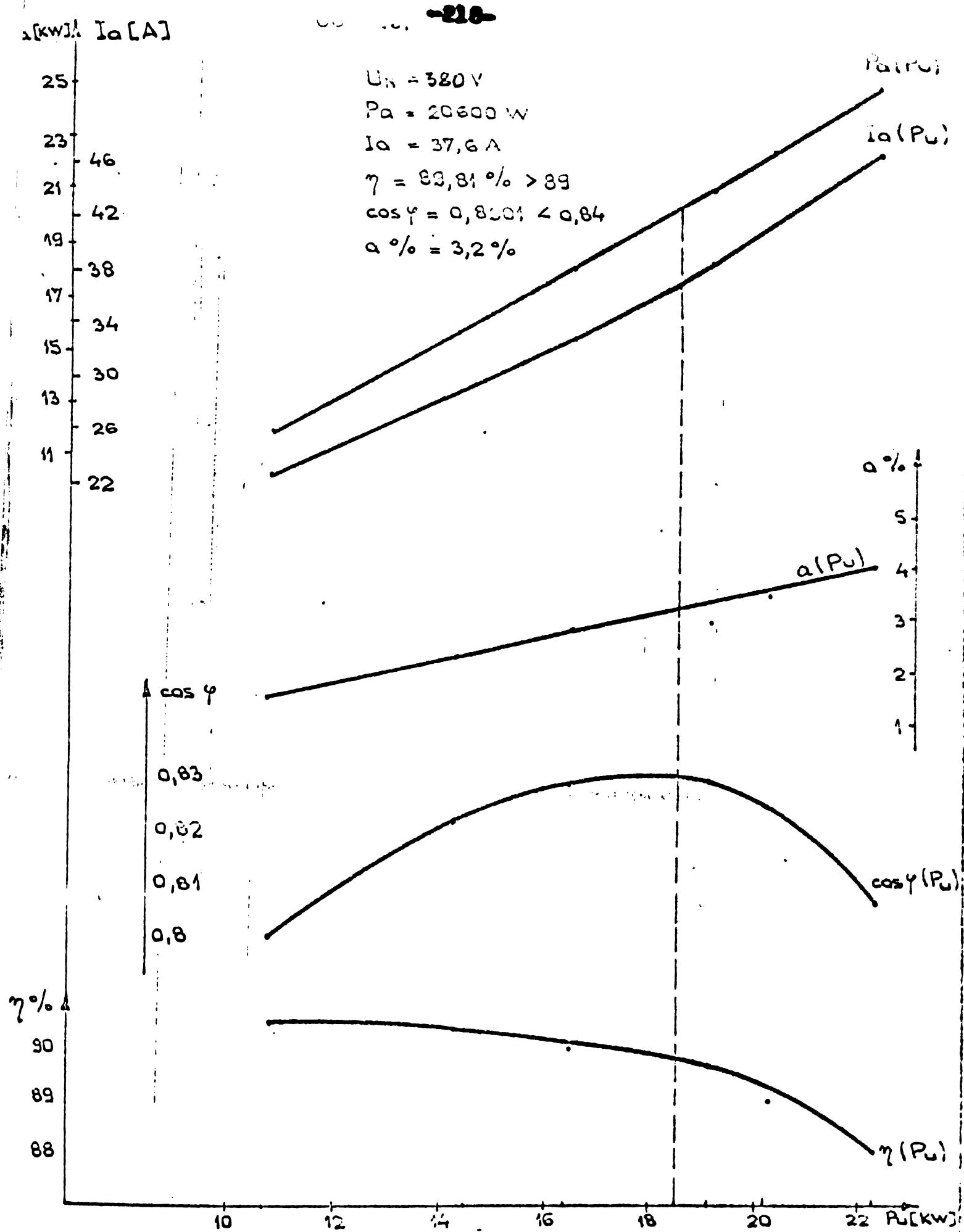
INCERCAREA Nr. 18

Rezultatele acestei încercări sunt conform anexei 9.





Data	Tipul mașinii	Incercați	Calculat	Verificat
22.06 9.3	B3 180 · · · 18,5 kW 220/380 V	1500 rev/min	675 187 425	675 187 425
			INSTITUTUL DE CERCETARI PR. INDUSTRIE ELECTROTEHNICALE	



Data	Tipul mazinii	Incercat	Calculat	Verificare
22.06	B3 180 : 4.0 13,5 kW 1500 rot/min 220 / 380 V 50 Hz	✓	✓	✓

INSTITUTUL DE CERCETARI
 PT. INDUSTRIA ELECTRICA

-22-

CALCUL DE LAZARE

ATM

15.8

1.03

$$\frac{M_0}{M_n} = \frac{1.59}{0.62} = 2.56$$

$$M_{max} = 2.56 \cdot M_n$$

$$\frac{M_{max}}{M_n} = \frac{0.80}{0.62} = 1.49$$

ATA	TIPUL MASINII	INCERCAT	CALCULAT	VERIFICAT
	Pz-180 A/S 0 220/230 V. 50 Hz 185/50	1.49	1.49	INSTITUTUL DE CER STIRI PTR. INDUSTRIE ELECTRO

2.2. Comparația valorilor calculate și măsurate a principaliilor parametrii fizici ai mașinii

TABEL NR. 7

Parametri	$R_{1,20^\circ}$	P_{Fe}	P_{miv}	P_{Cu_0}	P_o	I_o	P_{Cu_1}	P_{Al}	$P_{supl.}$	$P_{tot.}$	I_{lf}	M_P	I_P	η	$\cos \varphi_N$	λ	H
Valori	Ω	W	W	W	A	W	W	W	W	W	A	Nm	A	N			
Calculate	0,1643	507	159	62,2	728	11,28	824	515	92,5	2037,5	36,7	302,22	22301	0,8981	0,8437	0,028	
Măsurate	0,1619	425	187	63	675	11,2	836	620	103	2171	37,6	302,08	202,29	0,895	0,8301	0,032	

OBS. Se remarcă faptul că valorile parametrilor garantati prezintă diferențe neglijabile iar acolo unde diferența este sesizabilă ca de exemplu în cazul lui I_P – valoarea calculată este determinată acoperită pentru a evita riscul depășirilor valorii garantate ($5,5 I_{lf}$); la valorile parametrilor fizici, diferența ce apare la P_{Fe} se datorează faptului că în calcul s-a lucrat cu $P_{10} = 3,3$ W/kg (a se vedea tabelul anexă la modelul matematic) iar prototipul a fost realizat cu bandă laminată la rece având $P_{10} = 2,6$ W/kg.

CAP.H. EFICIENTA ECONOMICA, CONSIDERATII SI CONCLUZII FINALE

1. Eficiență

Metodele de optimizare elaborate de autor, adică :

- metoda pentru optimizarea pasului înfășurării mașinii de inducție (y_{opt}) și.
- metoda de optimizare generală (proiectarea optimală) a mașinii de inducție cu rotor în dublă colivie, precum și,
- metoda de optimizare longitudinală elaborată de către conferențiar Dr.Ing. B.Oprendek în colaborare cu autorul prezentei lucrări, au fost aplicate cu succes în practică industrială la întreprinderea Electromotor Timișoara.

Economiile postcalculate prin aplicarea metodei de optimizare a pasului înfășurării (y_{opt}) pe durata unui an pentru un gabarit se cifrează la suma de 711.090 lei respectiv 15.775 kg. la conductor din cupru, material deficitar pe plan mondial. (A se vedea calculul economic întocmit de compartimentul de specialitate al I.E.M.T. redat în anexa 4.).

Economiile postcalculate la nivelul unui an, prin aplicarea metodei de optimizare longitudinală (stochastică - extrapolativă) se ridică la suma de 36.579.427 lei, constând în principal în reducerea consumului de bandă silicioasă, conductori de cupru, aluminiu și materiale electroizolante, (A se vedea calculul economic întocmit de serviciul finanțier-prețuri al IEMT, anexa 6).

Aplicând metoda de proiectare optimală, prin programare neliniară, la motorul ASID-CT 200/4, 18,5 kW 1500 r/m, rezultă o economie de 1.453 lei pe motor față de 210 lei obținuți prin optimizarea longitudinală a omologului său cu bare finale (30 kW, 1500 r/m) și față de maximul de 569 lei obținuți prin aplicarea aceleiasi metode de optimizare longitudinală la motorul B3 200 1/6, 18,5 kW 1000 r/m.

Fără a ne hazarda în a extrapola economia unitară obținută la motorul ASID-CT, la nivelul întregii producții a uzinei Electromotor, cu atât mai mult cu cît motoarele de uz general, cu bare finale, au fost reproiectate respectiv optimizate prin diverse metode, mai puțin prin metoda programării neliniare, se poate concluziona că prin aplicarea acestei metode, elaborate de autor în prezentă lucrare, la seria de motoare din inducție numai din fabricația IEMT se vor obține economii de ordinul zecilor de milioane reflectând reducerea consumurilor specifice, în special la materialele active și deficitare totodată cum sunt: bandă silicioasă, cupru și aluminiu.

2. Consideratii și concluzii finale

Plecind de la faptul că metodele de proiectare optimală a mașinii de inducție elaborate de autor și descrise în prezentă lucrare, sunt generatoare de economii substanțiale, economii ce decurg în principal din reducerea consumurilor specifice la materialele active ce intră în componența mașinii, materiale scumpe și deficitare, considerăm că lucrarea constituie o modestă contribuție a autorului la ampla acțiune de reducerea cheltuielilor materiale, în lumina indicațiilor date de către conducerea de partid și de stat.

În dorința de a amplifica eficiența acestor metode de proiectare, consider util ca acestea să fie însușite de către un institut central de cercetare și inginerie tehnologică, mă refer concret la ICPE București, pentru a fi generalizată această experiență la toate fabricile de mașini electrice din țară.

Apreciez că n-ar fi lipsit de interes și mai cu seamă de eficacitate ca studenților din ultimii ani din facultățile de profil să li se prevadă în program, la disciplina privind proiectarea și construcția mașinilor electrice noțiuni de programare liniară și îndeosebi neliniară, instrument deosebit de eficient și elegant în proiectarea optimală a mașinilor electrice.

*

* * *

*

* * *

In final, mi-aș permite să aduc un călduros omagiu conducătorului meu științific, profesor Dr.Ing. NOVAC, pentru îndrumarea deosebit de atentă și competentă care mi-a acordat-o pe „lungul” parcurs al pregătirii mele ca doctorand și pe parcursul elaborării tezei de doctorat.

Doresc de asemenea să mulțumesc mult stimaților profesori Dr.Ing.Toma Dordea, Dr.Ing.Constantin Sora, Conf. Dr. Ing. B.Oprendek, Dr. Kauffmann, toți de la I.P.T.V. Timișoara, care m-au îndrumat în perioada pregătirii examenelor de specialitate: mașini electrice, bazele electrotehnicii și analiza numerică și programare calculatoare.

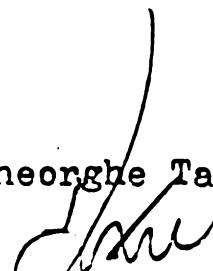
Mulțumesc în același timp stimatului Prof.Dr.Ing. I.Dancea de la Facultatea de Electrotehnică a Institutului Politehnic din Cluj-Napoca pentru sprijinul acordat în programarea pe calculatorul FELIX C-256 a principalilor algoritmi de programare neliniară.

Mulțumesc totodată, și nu în ultimul rînd, colegilor de la întreprinderea Electromotor pentru sprijinul tovărășesc pe care l-am primit din partea D-lor în realizarea prototipurilor și încercarea lor.

Mulțumiri călduroase și gratitudine tuturor celor care m-au sprijinit în rezolvarea acestei laborioase probleme și pe care nu am reusit să-i nominalizez.

Timișoara, 5 iulie 1979

Ing. Gheorghe Tatu,



B I B L I O G R A F I E

1. ANDERSEN O.W. Optimizing routine MONICA
In: IEEE Winter Power Meeting, New York, ian.1970 (conference Paper).
2. ANDERSEN O.W. Optimum design of turbine generators
In: - idem - (1)
3. ANDERSEN O.W. Transformer design program. Ed. Institutt for elektriske mashiner.
Trondheim, iul. 1974.
4. ANDERSEN O.W. Optimum design of electrical machines.
In: Trans.IEEE PAS-86, iun. 1967.
5. APETREI C. Determinarea soluției optime în proiectarea mașinilor electrice.
In: Studii și cercetări de energetică 12, nr.1-A, 1962, p.117.
6. APETREI C. Interdependențe între parametrii și caracteristicile de funcționare în mașini asincrone.
In: Stud.Cercet.Energ.19,nr.1 1969, p.181.
7. APPELBAUM J., ERLICKI M.S. A problem of economic optimization of electrical equipment design.
In: Trans.IEEE,CE-83, 1946, p.773.
8. APPELBAUM J. Determination of slot dimensions of double squirrel-Cage and deep-bar rotors.
In: Trans.IEEE PAS-91, nr.4 1972, p.1513-18.
9. APPELBAUM J. Performance analysis of an induction machine
In: IEEE Power Eng.Soc.Conf.Pap. Winter Met., New York, N.Y., 1975.
9. APPELBAUM J. Proiectarea economică a mașinii de inducție.
ETZ 9.09.74, pag. 450-453.
ETZ.A Bd. 95(1974) H9.

10. ASLAN H.,
OPRISAN M.

Unele considerente asupra optimizării pe ordinatator a proiectării motoarelor asincrone.
In: Electrotehnica 9, nr.6., 1971.
11. BAHM E.

Entwerfen von electrischen Maschinen mit Digitalrechnern.
In: E.u.M. 80, nr.19-20, 1964
p. 441-447.
12. BALA C.V.

Proiectarea mașinilor electrice.
Ed.did. și ped. București, 1967
13. BIRH R.S.,
BUTLER O.I.

Permeance of closed slot bridges and its effect on induction-motor current computation.
In: Proc.IEE 118, nr.1, 1971.
14. BENKO S.,
LENGYEL Z.,
NEMETH K.

Program de calcul al motoarelor asincrone cu rotor bobinat și în scurtcircuit pe calculatoare numerice.
(lb. maghiară).
In: Elektrotehnika 65, nr.8-9, 1972.
15. BERGER TH.

Probleme der optimalen Auslegung von Niederspannungs Asynchronmotoren.
In: Elektrie 25, nr.2, 1971.
16. BOX M.J.

Anew method of constrained optimization and a comparison with Other Methods.
In: Computer Journal 9, 1976.
17. BOX M.J.

A comparison of Several Current Optimization Methods and the Use of Transformation in Constrained Problems.
In: Brit.Computer J., 9, 1966, p.67-78.
18. BRAND I.,
JANOUSEK J., s.a.

Utilization of computers in the design of rotating electric machines in the engineering works CKD Prague
In: Electrotech.Obzor.57,Nr.10,1968.
19. BRENT R.P.

Algoritms for Minimization without Derivates.
In: London, Prentice-Hall, 1973.
20. CHALMERS B.J.,
BENHINGTON B.J.

Digital-computer program for design synthesis of large squirrel-cage induction motors.
In: PROC.IEE 114, nr.2, 1967.
21. CHALMERS B.J.,
DOGSON R.

Saturated leakage reactances of cage induction motors.
In: Proc.IEE 116,nr.8,1969, p.1395-1404.

22. CHALMERS B.J.,
NARAIN C.K.
Pierderi produse de frecvență înal-
- tă a motoarelor de inducție cu colivie la funcționarea în gol.
In: Trans.IEEE PAS-89. nr.6,1970.
23. CHALMERS B.J.,
MULKI A.S.
Design synthesis of doublecage induction motors.
In: Proc.IEE 117, nr.7, 1970.
24. CRAIU I.,
IONESCU M.,
RADU N.
Matematici pentru economiști.
Ed.Tehnică,București, 1966.
25. Dancea I.
Metode de optimizare.
Ed.Dacia, Cluj,Napoca, 1976.
26. DANCEA I.
Programarea calculatoarelor numerice
Ed.Dacia, Cluj-Napoca, 1973.
27. DE SARKAR A.K.,
BERG G.J.
Digital simulation of three-phase induction motors.
In: Trans.IEEE PAS-89, nr.6, 1970.
28. DIAMANT P.
Anew approach to multi-segmented rotor slot design for induction motors.
In:Trans.IEEE PAS-91, nr.6, 1972.
29. DORDEA T.
Calculul de optimizare a mașinilor electrice de inducție cu rotor în colivie.
In: Imbunătățirea parametrilor tehnico-economici ai motoarelor electrice fabricate de întreprinderea Electromotor. Contract nr.7473/21. 05.1973, Timișoara.
30. DORDEA T.
Beitrag zur Zweiachsenteorie der elektrischen Maschinen.
In: Archiv für Elektrotechnik, 50 H.6, 1966, p.362-371.
31. DORDEA T.
Mașini electrice (curs) vol.I și II.
Institutul Politehnic Timișoara,1967
32. DRAGOMIR P.,
DRAGOMIR A.
Structuri algebrice.
Ed.Facă, Timișoara, 1975.
33. DUMITRU V.
Metode de optimizare a funcțiilor fără evaluarea derivatiei.
In: Studii și cercetări de calcul economic și cibernetică economică, nr.3, 1973.
34. DUMITRU V.
Programarea neliniară.
Ed.Academiei RSR, 1976.

35. DUMITRU V.
MOGA S.
Contribuții la evaluarea eficienței
tehnicii de optimizare sevențială.
In: Studii și cercetări de calcul
economic și cibernetică economică,
nr.6, 1973.
36. EPURAN M.M.,
TATU G.
Optimul economic în fabricația mașinilor
electrice prin promovarea metodei "analiza" valorii.
In: Electrotehnica 22, nr.1, 1974.
37. ERLICKI M.S.,
APPELBAUM J.
Optimised parameter design of an
induction motor.
In: Trans.IEEE, TP 65-7, 1965.
38. ERLICKI M.S.
Parasitic torques of saturated
asynchronous motors.
In: Trans.IEEE PAS-91, nr. 4, 1972,
p.1501-5.
39. FAZLOLLAH R.
Spații liniare.
Ed.Did. și Pedagogică, București, 1973.
40. FIHTENHOLT G.M.
Curs de calcul diferențial și integral.
Ed.Tehnică, București, 1963.
41. FIACCO A.,
MC.CORMICK G.P.
The sequential unconstrained minimization
technique for nonlinear programming,
a primal-dual method.
In: Management Sci., 10, nr.2, 1964,
p.360-366.
42. FIACCO A.,
MC.CORMICK G.P.
Computational algorithm for the
sequential unconstrained minimization
technique for nonlinear programming.
In: Management Sci., 10, nr.2, 1964,
p. 601 - 617.
43. FIACCO A.,
MC.CORMICK G.P.
Sequential unconstrained minimization
techniques for nonlinear programming.
In: New-York, John Wiley et Sons,
Inc., 1968.
44. FLETCHER R.,
POWELL M.J.D.
A rapidly convergent descent method
for minimization.
In: Brit.Computer J., 6, 1963,
p.163-168.
45. FLETCHER R.,
REEVES C.M.
Function minimization by conjugate
gradients.
In: Brit.Computer J., 7, 1964,
p. 149-154.

46. FROHNE N.
Rationalisierung beim Entwurf elektrischer Maschinen unter Werwendung digitaler Rechenautomaten.
In: ETZ-A, 84, nr.2, 1963, p.69, 49-57.
47. GHEORGHIU I.S.
Mașini electrice. Probleme și aplicații industriale. vol. I, București Ed.Tehnică, 1968.
48. HOOKE R.,
JEEVES T.A.
Direct search solution of numerical and statistical problems.
In: Journal of ACN, vol. 8, 1961, p.212
49. ISTVANFY G.
Calculul funcționării motoarelor electrice cu calculatoare numerice (lb.maghiară).
In: Elektrotechnika 65, nr.8-9, 1972, p.303-323.
50. JOHNSON A.E.
The application of computers to the solution of induction motor thermal circuits.
In: Trans.AIEE PAS-75, part.III, 1956, p.1543-46.
51. JORDAN H.E.
Digital computer analysis of induction machines in dynamic systems.
In: Trans. IEEE PAS-86, nr.6, 1967, p.722-728.
52. JORDAN H.E.
Synthesis of double-cage induction motor design.
In: Trans.AIEE PAS-78, nr.44, 1959, p.691-95.
53. KAGAN B.M.
TER-MIKHAELIAN T.M.
Rezolvarea problemelor inginerestii cu calculatoare numerice.
Ed.Tehnică, București, 1965, p.386-410.
54. KAUFMANN A.
Metode și modele ale cercetării operaționale.
In: Ed.St.București, 1967.
54. KAUFMANN A.,
PRECIGOUT M.
Elemente de teoria mulțimilor și algebră modernă. (2 vol.).
Ed.Tehnică, București, 1973.
55. KLINGSHIRN E.A.,
JORDAN H.E.
Simulation of polyphase induction machines with deep rotor bars.
In: Trans.IEEE PAS-89, nr.6, 1970.
56. KRAUSE P.C.,
THOMAS C.H.
Simulation of symmetrical induction machinery.
In: Trans.IEEE PAS-84, nr.11, 1965, p.1038-1053.

57. LEON S.LASDON
Teoria optimizării sistemelor mari.
In: Ed.Tehnică, Bucureşti, 1975.
58. LENGYEL Z.,
NEMETH
Dependenta reactantei de dispersie
în raport cu curentul la motoare
asincrone. (lb.maghiară).
In: Elektrotechnika 65, nr.8-9, 1972.
59. LEUVEN J.
Ein Beitrag zur optimalen Bemessung
elektrischer Maschinen.
In: ETZ-A, Bd.94, (1973), H.7, p.435.
60. LUSTERNIK L.A.,
SOBOLEV V.J.
Elements of functional analysis,
Hindustan publishing corprn (I)
Delhi.
61. LUTZ K.
Arten und Gestaltung der digitalen
Berechnungsprogramme elektrischer
Maschinen.
In: ETZ-A 87, nr.14, 1966.
62. MALITA M.,
DRAGOMIRESCU M.
Programarea patratică.
Ed.Stiintifică, Bucureşti, 1968.
63. MAMEDOV F.A., s.a.
Modelarea matematică a pierderilor
din motoare asincrone (lb. rusă).
In: Elektrotehnica, 8, 1971, p.2-4.
64. MANESCU M., s.a.
Statistica calității producției in-
dustriale.
Ed.Did.șii Ped.Bucureşti, 1965.
65. MARINESCU G.
Matematici superioare.
Ed.Did.șii Ped. Bucureşti, 1970.
66. MARINESCU G.,s.a.
Problema de analiză matematică.
Ed.Did.șii Ped.Bucureşti, 1978.
67. MARINESCU M.
Metoda de calcul pe calculator pentru
reactanța de dispersie a motoarelor
de inducție cu creștături rotorice
complet închise.
In: Lucrările ICPE,nr.22, 1969.
68. MARTOS B.
Nonlinear programming theory and
methods.
Akademiai Kiado, Budapest, 1975.
69. MENZIES R.,W.,
NEAL G.W.
Optimisation program for large induc-
tion motors design.
In: Proc.Inst.Elec.Eng.nr.6, 1975.
70. MARUSCIAC I.
Metode de rezolvare a problemelor de
programare neliniară.
In: Ed.Dacia, Cluj-Napoca, 1973.
71. Mc.CRACKEN D.D.
A guide to FORTRAN IV programming.
In: John Wiley et Sons. inc.New-York.

72. MASANAO A.
Introduction to optimization techniques. Fundamentals and application of nonlinear programming.
In: University of California, Los Angeles. The Mac-Millan Company, New-York.
(trad.l.rusă, Ed.Nauka, Moscova, 1977).
73. MIHOC G., STEFANESCU A.
Programarea matematică.
In: Ed.Didactică și Ped.București, 1973.
74. NELSON R.H.
LIPO TH.A..
KRAUSE P.C.
Stability analysis of a Symmetrical induction machine.
In: Trans.IEEE PAS-88, nr.11, 1969, p.1710-17.
75. NICOLAIDE H.
Mașini electrice.
76. NICOLESCU E.
Aspecte ale proiectării seriilor unitare de motoare asincrone.
In: Electrotehnica 16, nr.6, 1968, p.205-214.
76. NICOLESCU E.
Aspecte ale proiectării seriilor unitare de motoare asincrone.
In: Electrotehnica 16, nr.6, 1968, p.205-214.
77. NOVAC I.
Calculatoarele analogice și numerice în studiul și construcția de mașini electrice.
In: Electrotehnica, nr.10, 1967, p.410-417.
78. NOVAC I., VERES F.
Soluții privind optimizarea metodei de calcul al pierderilor în miezul mașinilor asincrone.
In: - idem - (29).
79. NOVAC I.
Mașini electrice.
Institutul Politehnic, 1967.
Timișoara.
80. NURNBERG W.
Die Asynchronmaschine, Springer - Verlag, Berlin, 1963, p.72-83.
81. OPRENDECK B., MULLER V.
Probleme de optimizare transversală a motorului asincron.
In: - idem (29).
82. OPRENDECK B., TATU G., CONSTANTIN G.
Procedeu de obținere a unor infăsuărări electrice cu fiabilitate ridicată.
In: Dosar OSIM nr.74402/o7.04.1973, și certificat de inventator nr.59714

83. OPRENDECK B.,
TATU G.
Metode de optimizare a mașinii asincrone.
Ses.Comunic. st. IPTV. dec. 1972.
84. OPRENDECK B.
Contribuții la controlul industrial
al caracteristicilor mecanice a para-
metrilor nominali ai mașinilor de
inducție.
In: Teza de doctorat, IPT, Timișoara,
1966, cap.IV.
85. PEARSON J.D.
Variable metric methods of minimiza-
tion.
In: Brit.Computer J., 12, 1969,
p. 171-178.
86. PIOTROVSCHI L.M.
Mașini electrice.
In: Ed. Energetică de stat. București
1953.
87. POSTNICOV I.
Pierderile și dimensiunile economice
ale mașinilor electrice și ale trans-
formatoarelor.
In: Elektricestvo, nr.9, 1961, p.2-9.
88. POWELL M.J.D.
An efficient method for Finding the
minimum of a function of several va-
riables without calculating Deriva-
tes.
Computer Journal F - 1964.
89. RAJAGOPALAN P.K.,
BALARAMA MURTY V.
Analysis of slotted rotor induction
machines taking saturation into
account.
In: J.Inst.Eng.(India) Elec. Eng.Div.
51, nr.12, 1971.
90. RADIN V.I.
Calculul termic al motoarelor asin-
crone în scurtcircuit în execuție
protejată cu ventilație radială și
putere sub 100 kW (lb. rusă).
In: Izv.VUZ Elektromechanika nr. 5,
1965, p. 595-598.
91. RAMARATHNAM R.,
DESAI B.G.
Optimization of polyphase induction
motor design: A nonlinear programming
approach.
In: Trans.AIEE, part.III, 90, nr.2,
1971, p.570.
92. RAMARATHNAM R.,
DESAI B.G.
SUBBA RAO V.
A comparative study of minimization
techniques for optimization of induc-
tion motor design.
In: Trans.IEEE PAS-92, nr.5, 1973.

93. REICHE H. Der Einfluss der magnetischen Jochspannungen auf die Feldkurve von Asynchronmaschinen.
In: Elektrică 20, nr.8, 1966, p.307-8.
94. REICHE H. Berechnung der Standerjöche von Drehstrommaschinen bei Einsatz von Texturblech auf dem Digitalrechner ZRA-1.
In: Elektrică 18, nr.11, 1964, p. 343-346.
95. REICHE H. Der Einsatz von Rechenautomaten für elektrotechnische Berechnungen (5 articole).
In: Elektrică 21, nr.1, p.3-6, 1967.
96. RETTER G. Din problemele proiectării mașinilor electrice cu calculatoare numerice.
(lb. maghiară).
In: Elektrotehnika 65, nr. 8-9, 1972.
97. RICHTER R. Mașini electrice, vol. I-V.
Ed. Tehnică, 1969, București.
98. ROBERT J. A method for simulating electric machines.
In: Trans. IEEE PAS-90, nr.2, 1971.
99. ROBERTSON S.D.T., HEBBAR K.M. A digital model for threephase induction machines.
In: Trans. IEEE PAS-88, nr.11, 1969.
100. ROSEN J.B. The gradient projection method for nonlinear programming part.I - linear constraints.
In: SIAM J., Appl.Math., nr.8, 1960, p. 181-217.
101. ROSEN BROCK N.H. An automatic method for finding the greatest or least value of a function.
In: Computer Journal vol. 3, 1960, p.1975.
102. SAMSINGER E. Calculul mașinii asincrone cu calculatoare numerice.
In: E.u.M., 80, nr.19-20, 1963, p.447.
103. SAUNDERS R.M. Digital computers as an aid in electric machine design.
In: Trans.AIEE part.I, 73, 1954, p. 189.
104. SCHUISKY W. Proiectarea unei serii noi de mașini.
In: Induktionsmaschinen, Wien, 1957, p. 430-437.

- - -
105. SCHUISKY W. Berechnung elektrischer maschinen,
Springer-Verlag, Wien, 1972.
106. SEQUENZ H. Analog und Digitalrechner bei den
elektrischen maschinen.
In: E.u.M., 79, nr.17, 1962,
p. 413-440.
107. SOFRONOV V.V., s.a. Studiul momentului de pornire la
motoare asincrone trifazate de mică
putere (lb. rusă).
In: Elektrotehnika 8, 1971, p.15-16.
108. SPINEI F.,
NECULA N.,
MAGUREANU R. Calculul circuitelor de ventilație
ale mașinilor electrice utilizând
metoda Newton, inițializată printr-o
metodă de încadrare.
In: Electrotehnica 19, nr.6, 1971.
109. SPIRCU L. Unele aspecte privind metodele de
rezolvare a problemelor de programare
neliniară.
In: Studii și cercetări de calcul
economic și cibernetică, nr.1, 1974.
110. STEPHEN D.S. Using Digital Computers to Design
Electrical Machines.
In: Engineering, 187, 1959, p.718-720
111. SCHWARTZ B. Geometrical Approach to the Economical
Design of Rotating Electrical
Maschines.
In: Proc. IEE, 113, nr.3, 1966,
p. 493-499.
112. SCHIOPU Al.I. Metode aproximative în analiza neli-
niară.
In: Ed.Acad. RSR, Bucureşti, 1972.
113. TATU G. Scurtarea economică optimă a pasu-
lui de bobinaj la motoare de induc-
tie.
Ses.Comunic.șt. IPTV, dec. 1972.
114. VEINOTT C.G. Induction machinery design being
revolutionized by the digital computer.
In: Trans. AIEE part. III, 75, 1956,
p. 1509-1517.
115. VEINOTT C.G. Synthesis of induction motor design
on a digital computer.
In: Trans.AIEE part.III, 79, 1960,
p.12.
116. VEINOTT C.G. Electric machinery design by digital
computer after nine years.
In: Electrical engineering, 82, nr.4,
1963, p.275-280.

117. WACHTER T.,
DULHAZ B.,
ECKSTEIN I.
Un program pentru proiectarea motoarelor asincrone trifazate utilizînd calculatorul electronic IRIS-50.
In: Lucrările ICPE, nr.28, 1973, p.23-31
118. WACHTER T.
Un program pentru proiectarea motoarelor utilizînd calculatoare electronice de capacitate mică.
In: Electrotehnica 18, nr.1, 1970, p.7-12.
119. WACHTER T.
Metoda de calcul a umplerii creștărilor la mașinile electrice bobinate cu conductoare rotunde.
In: Electrotehnica 17, nr.2, 1969, p.50-52.
120. WEH H.,
MEYER J.
Calculul direct al curentului și cuplului la mașinile asincrone.
In: ETZ-A 87, nr.14, 1966, p. 504-512.
121. WILDE D.J.
Optimum seeking methods.
In: Englewoodschiffs, NJ, 1964, cap.2
122. WOLFF P.A.,
Duality theorem for non-linear programming.
In: Appl.Moth.19, nr.3, 1961, p.239-244.
123. ZOUTENDIJK G.
Methods of feasible directions.
In: N-Y, American Elsevier Publishing Company, Inc., 1960.
124. * * *
Metodica de proiectare MC-3/1962 și MC-5/1965. Motoare asincrone trifazate asincrone cu rotorul în scurtcircuit.
125. * * *
Metodica de calcul D-4092. Motoare asincrone trifazate cu rotorul în scurtcircuit.
Uzina de Mașini Electrice, Bucuresti.
126. * * *
Metodica de calcul electromagnetic PMA O3A/1968. Motoare asincrone trifazate cu rotorul în scurtcircuit.
Institutul de cercetări și proiectare pentru industria electrotehnică.
127. * * *
Manualul inginerului electrician vol. II.
In: Ed.Tehnică, București, 1954.
128. * * *
Metodica de calcul DUBLACOL.
Electromotor Timișoara.
129. * * *
Metodica de calcul și programul OPTILIM.
Electromotor Timișoara.

ANEXA NR. 1

SCHEMA LOGICA A PROGRAMULUI - Y_{optim}

4 pagini

INTRODUCERI γ (20,60), ν (v1) ; (v2), ECR (v1)
STR (68) ; ZMA (v1), v1 = 1

FORMAREA TABELELOR

$$\pi = 3,14159$$

$$I = 1$$



$$SIR(I) = SCAD$$

$$I = I + 1$$

NU
DA
 $I > 68$

TIPARIRE CAP
TABEL NR.1

FORMAREA UNIEI DC
DE MARCAJE A ZONELOR
DE TABEL.

$$L = 1$$



TIPARIREA
VALORII Q

$$M = 3 * K / 2$$

$$N = 3 * L - 1$$

$$J = 1$$



Q = număr de creșături pe pol și
față.

Determinarea limitelor unui
ciclu de calcul $Q = \text{const.}$

$$y(k,j) = \frac{j}{3 \cdot k}$$

$$z = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\sin(y(k,j) \cdot \frac{\pi}{3})}{\cos(y(k,j) \cdot \frac{\pi}{3})} - y(k,j)$$

$$L = 3K$$

$$E = 1 - \left(\frac{z}{\pi(1+z) \cdot \cos(y(k,j) \cdot \frac{\pi}{3})} \right)^2$$

CALCULUL FUNCȚIILOR.

TIPARIRE VALORII
(j, L), z, E

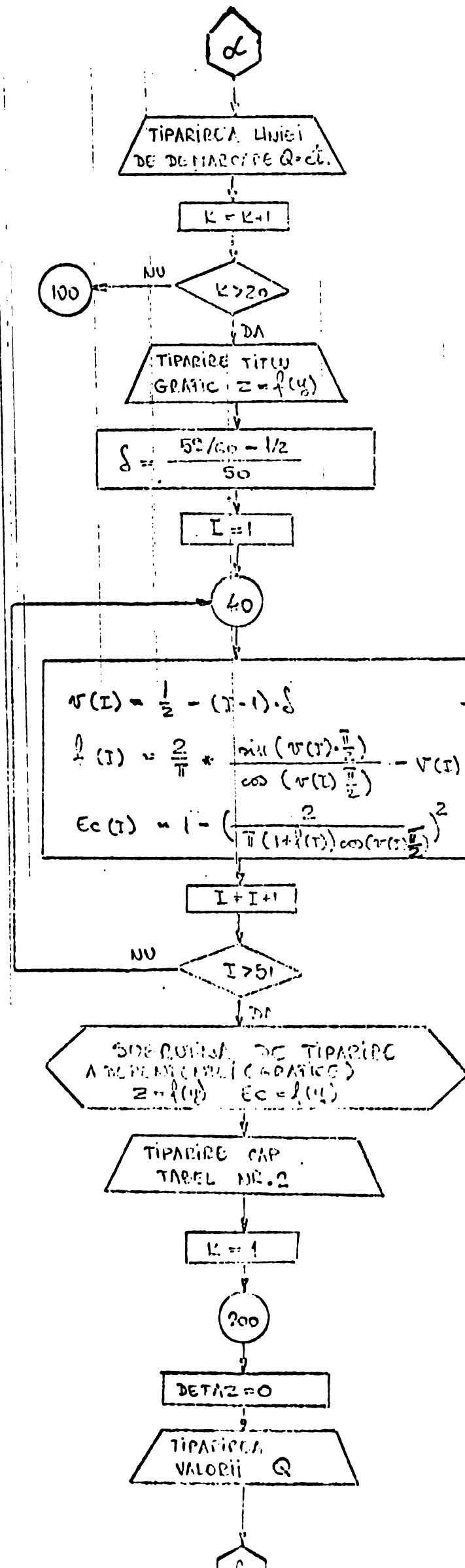
$$j = j + 1$$

NU
DA

$$j > N$$

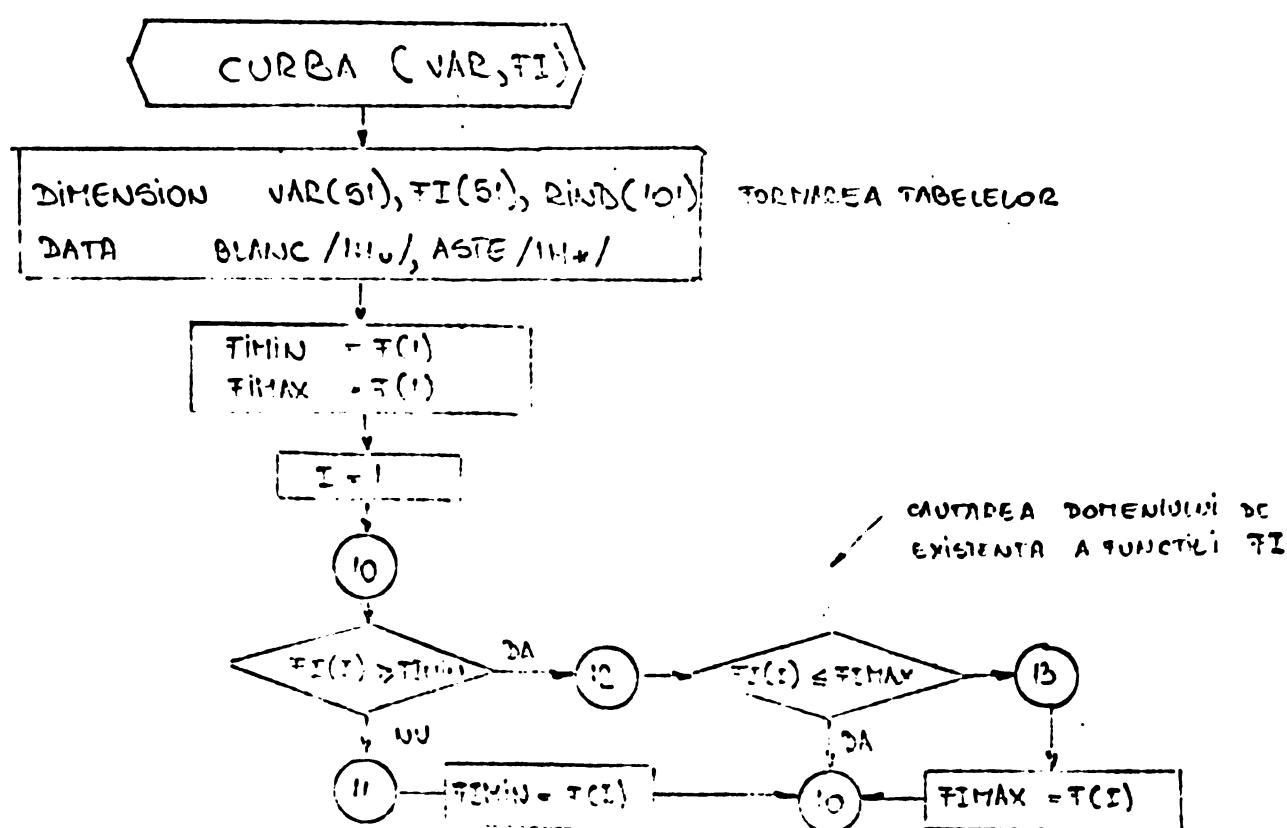
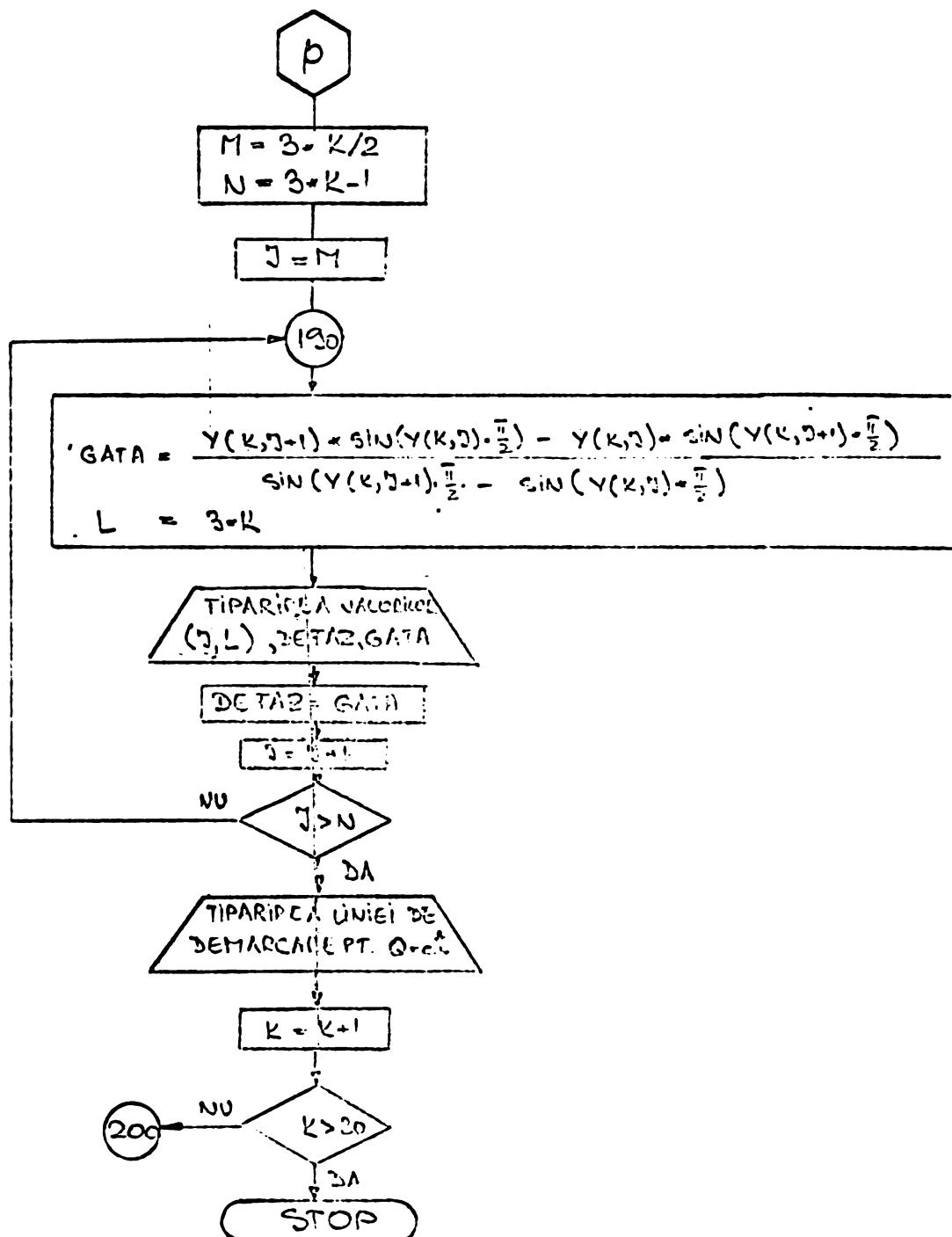


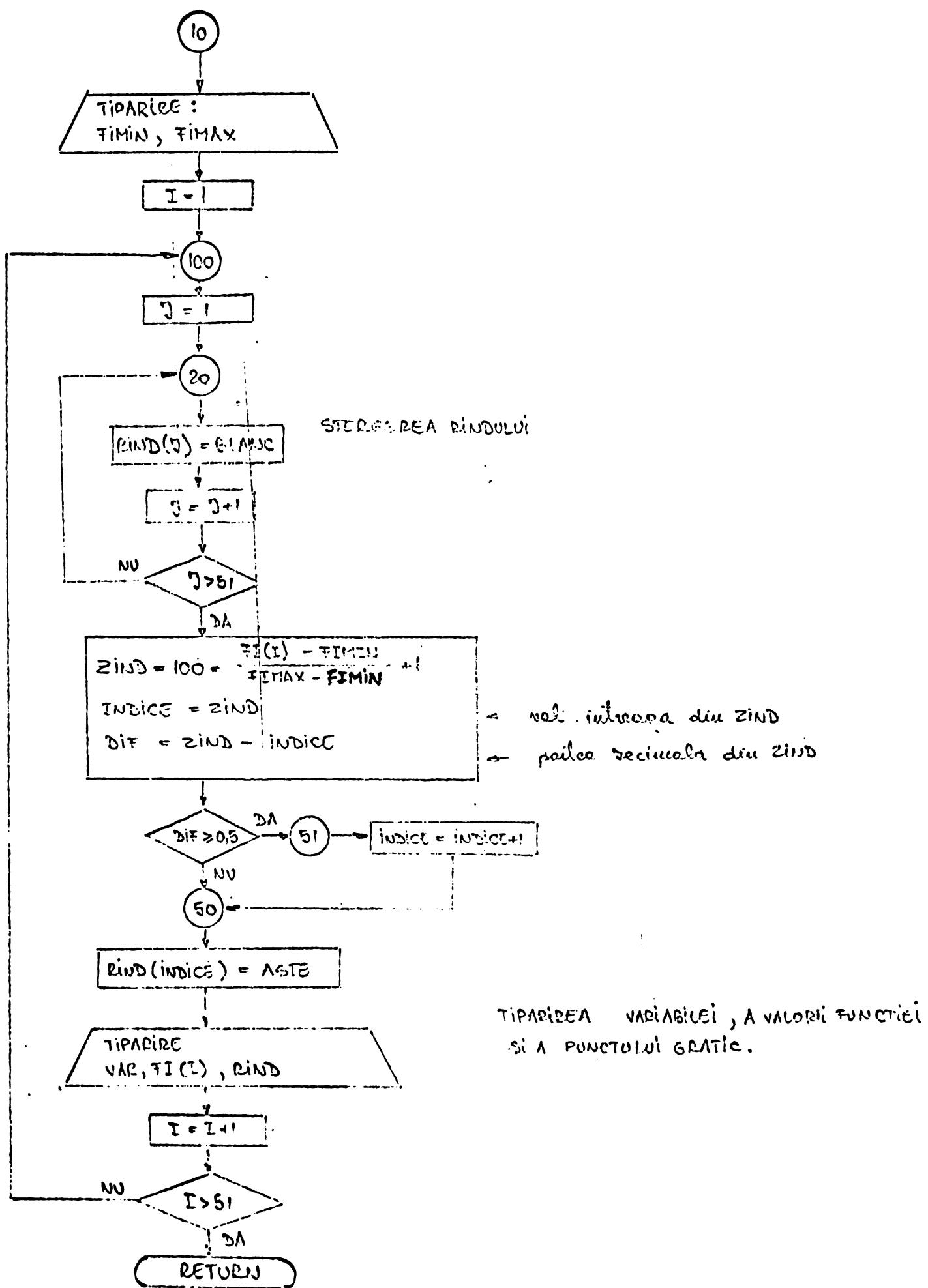
2



FORMAREA TABELELOR DE VALORI PENTRU TRASAREA SPATICA A FUNCTIILOR $z = f(u)$ $EC = f'(u)$

- SUBROUTINA CURBA (V, EC)





ANEXA NR. 2

LISTINUL (TAB.NR.1) CONTININD VALORILE LUI Y,Z și E

4 pagini

K	Y	Z	M
1	/	•034 •436	•425 •214
2	/	•137 •536 •543	•373 •214 •064
3	/	•930 •826 •722	•413 •322 •214 •100 •030
4	/	•137 •536 •449 •919	•373 •229 •133 •064 •017
5	/	•107 •826 •722	•401 •326 •214 •100 •031
6	/	•137 •826 •722	•373 •226 •153 •064 •000
7	/	•111 •826 •722	•373 •226 •123 •064 •000
8	/	•137 •826 •722	•373 •226 •113 •067 •017
9	/	•137 •826 •722	•373 •226 •113 •067 •004

• 384 • 385

३७

19

20

1

ANEXA 3

CURBELE DE VARIATIE ALE LUI X SI e

2 pagini

ANEXA NR. 4

LISTINGUL (TAB.Nr.2) CONTININD INTERVALELE $z_{j,q}$
IN CARE y SE MENTINE CONSTANT

4 pagini

Q-C

Y/TAU

AI+YI /BI

1

000

122
140

2

000

240
271

3

000

135
220

4

000

314
323

5

000

130
131

6

000

167
170

7

000

130
131

8

000

150
151

9

000

120
121

000

000

000

000

000

000

000

000

000

000

000

000

000

000

000

000

000

000

000

000

000

000

000

000

000

000

000

000

000

000

000

000

000

000

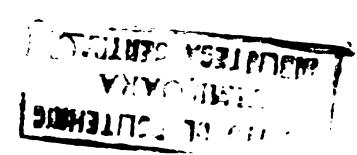
13

20

ANEXA Nr. 5

CALCULUL ECONOMIC PENTRU t_{opt}
APLICAT LA UN GABARIT DE MOTOARE

1 pagină



S I T U A T I A

economilor realizate pe un an prin aplicarea metodei de determinare a scurtării optime a pesului de bobinaj la gab. 160

=
Nr. Tipul motorului
ort. cond. bobinej
realiz. prin aplic. securt. opt.

	B3 160 L	18,5 x 3000 A	2000	0,565	1130	50.850
1.	15 x 1500 A	6350	0,860	5461	245.745	
2.	11 x 1000 A	2000	0,450	900	40.500	
3.	7,5 x 750 A	500	0,680	340	15.390	
4.	15 x 3000 A	3200	0,655	2096	94.320	
5.	11 x 3000 A	7000	0,457	3199	143.955	
6.	11 x 1500 A	2000	0,596	1192	53.640	
7.	7,5 x 1000 A	2500	0,374	935	42.075	
8.	5,5 x 750 A	350	0,540	189	8.505	
9.	4 x 750 A	1000	0,360	360	16.200	
10.						
					15.775	
					711.090	

SEF ATTEL. PROIECTARE

Ing. Platon D.

Allikurs

SEF SERV. FINANCIAR-PREMIURI

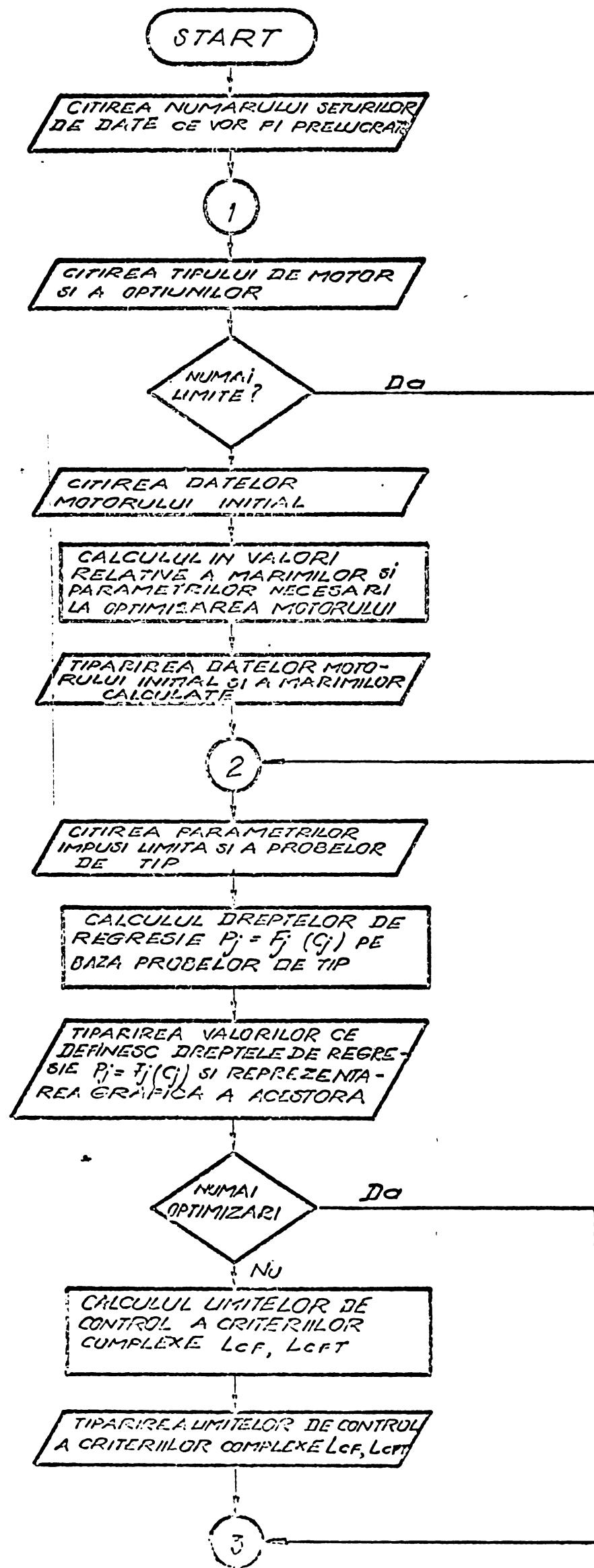
Tomici Vasile

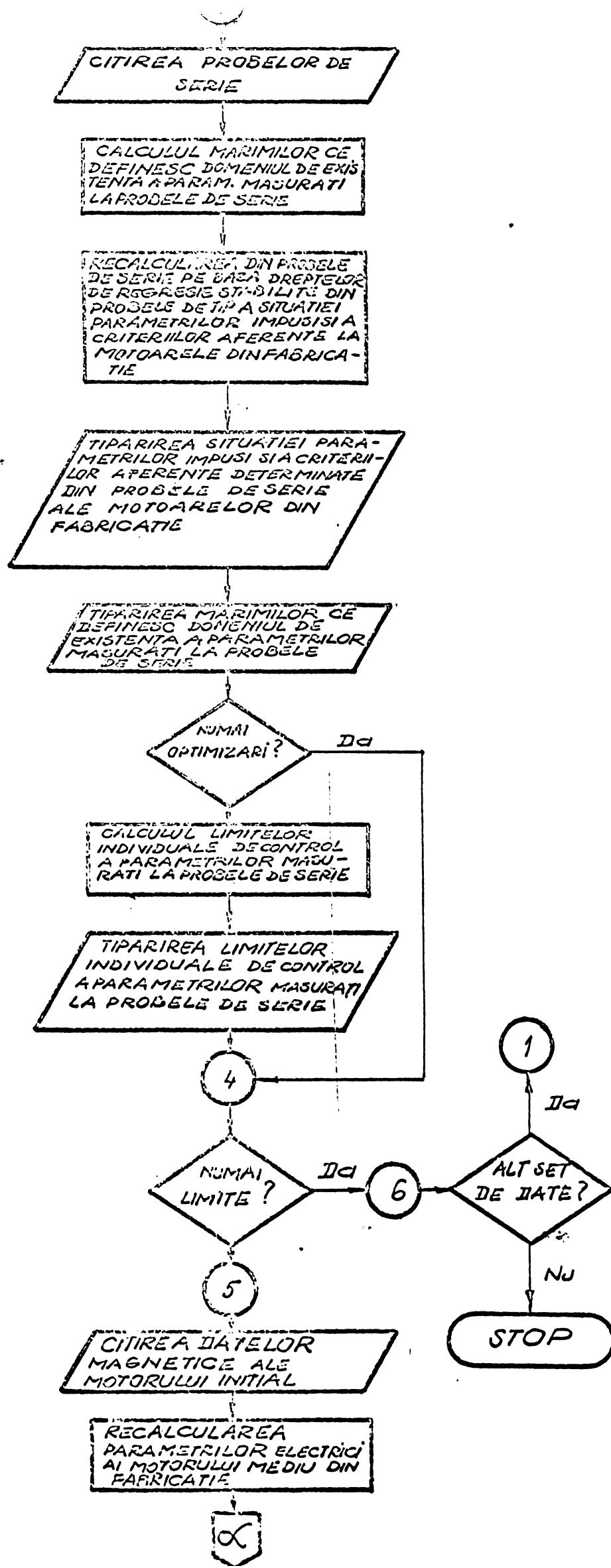
10

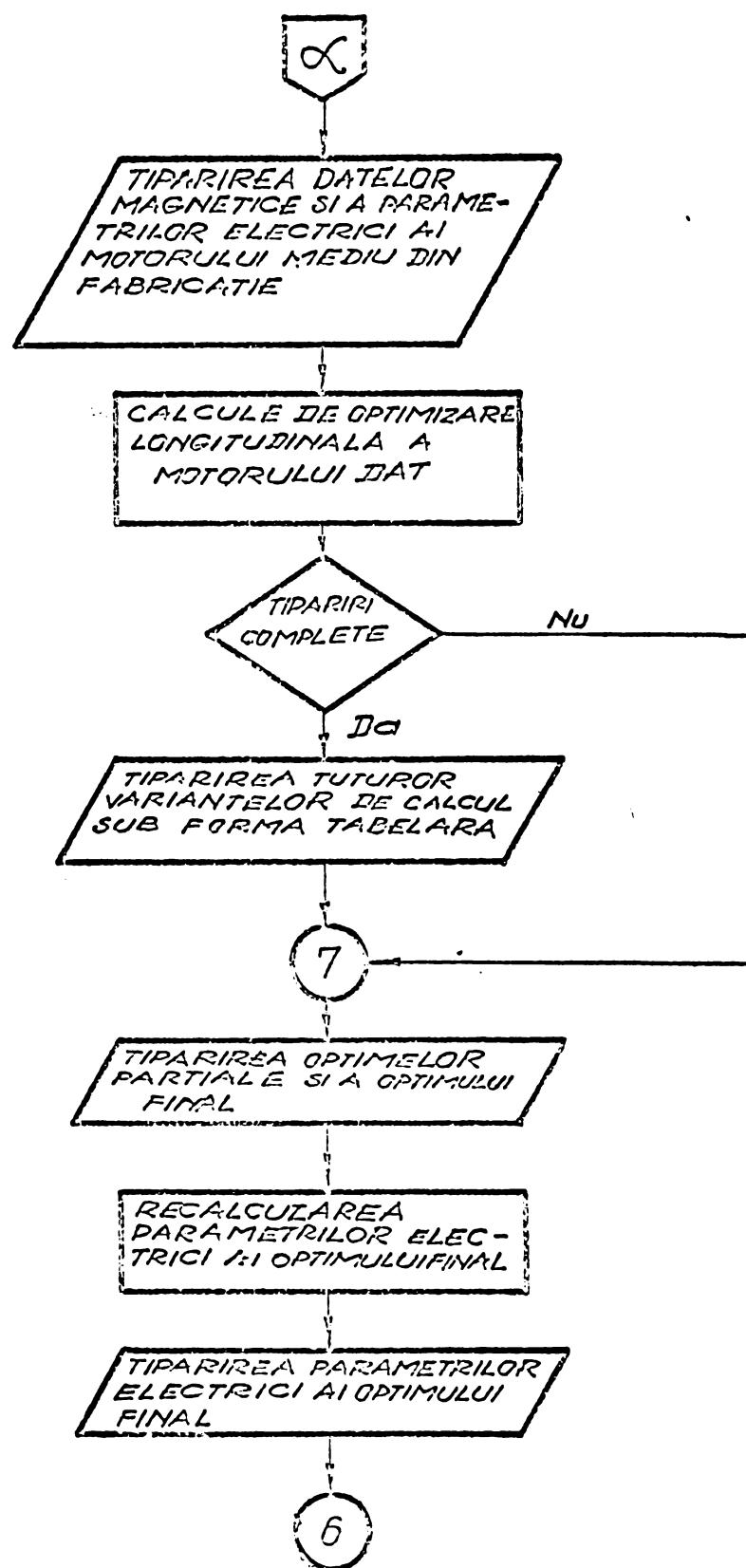
ANEXA NR. 6

**SCHEMA LOGICA ALORIC A PROGRAMULUI DE OPTIMIZARE
LONGITUDINALA**

3 pagini







ANEXA NR. 5

**CALCULUL ECONOMIC LA METODA DE OPTIMIZARE
LONGITUDINALA**

2 pagini

CAICUL ECONOMIC

pentru inovația dosar 616/29.12.1972
 "Metode pentru optimizari tehnico-economice"
 autor: conf. dr. ing. Oprendek Bernard
 ing. Tatu Gh.

22

Nr. crt.	Produsul	Buc. realizat in 1974.	Ec., antccalculate ec./buc., lei	Ec., postcalculate (1.01.74-31.12.74) prey cost realizat in 1971	Ec., la prey cost realizat in 1974 lei/buc., lei	8.	
		1.	2.	3.	4.	5.	6.
1.	B3-5 1/2	30/3000-200	1423	53	7541,9	4407	724307
2.	B3-5 200	1/4 30/1500	9525	210	2000250	4139	1990725
3.		1/5 18,5/1000	8010	569	4557690	3943,86	5837350
4.		1/5 22/1000	6676	592	2616992	3873,30	2797244
5.	B3-5 120	1/3 15/750	612	432	264384	4144,30	481644
6.		1/2 22/3000	1757	176	309232	3457	275349
7.		1/4 18,5/1500	4258	153	648414	3075	2110524
8.		1/4 22/1500	9456	169	1598064	3580	5990432
9.		1/6 15/1000	2348	219	514212	3233	650596
10.	B3-5 160	1/3 11/750	451	324	146124	3662	253011
11.		1/2 11/3000	3523	254	894842	3101	521404
12.		1/2 18,5/3000	4018	254	2385	2137	2013018
13.		1/2 11/1500	1954	340	2883	2382	1237468
14.	ASI 160	S/4 10x1500	3043	207	3130,33	2497	501
15.	B3-5 160	1/4 15x1500	2573	109	1020572	2382	1237468
16.		1/6 7,5x1000	4363	321	664360	3130,33	4126059
17.		1/6 11x1000	4948	150	1664901	2579	2066
18.		1/3 4x750	2286	300	280457	2112,35	1357,11
19.		1/3 5,5x750	437	119	1402128	3097,68	755
20.		1/3 7,5x750	480	252	742200	2112	237,6
21.			520	164	685800	564,80	2500
					1808	1875	2500
					1950	2310	2310
					2536,20	1791	1791
					120960	1745,7	1745,7
					85280	2409	2409
						127,2	127,2

- // -

O	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
22.	B3-5 132 S/4 5,5/1500	5318	183	973194	1663	1480	183	973194
	L/4 7,5/1500	5144	174	895056	1869	1694	75	385800
	S/2 5,5/3000	7130	93	663090	1504	1444	60	427800
	L/2 7,5/3000	2046	54	110484	1589	1535	54	110484

TOTAL ECONOMII:

postcalcul: 36579427

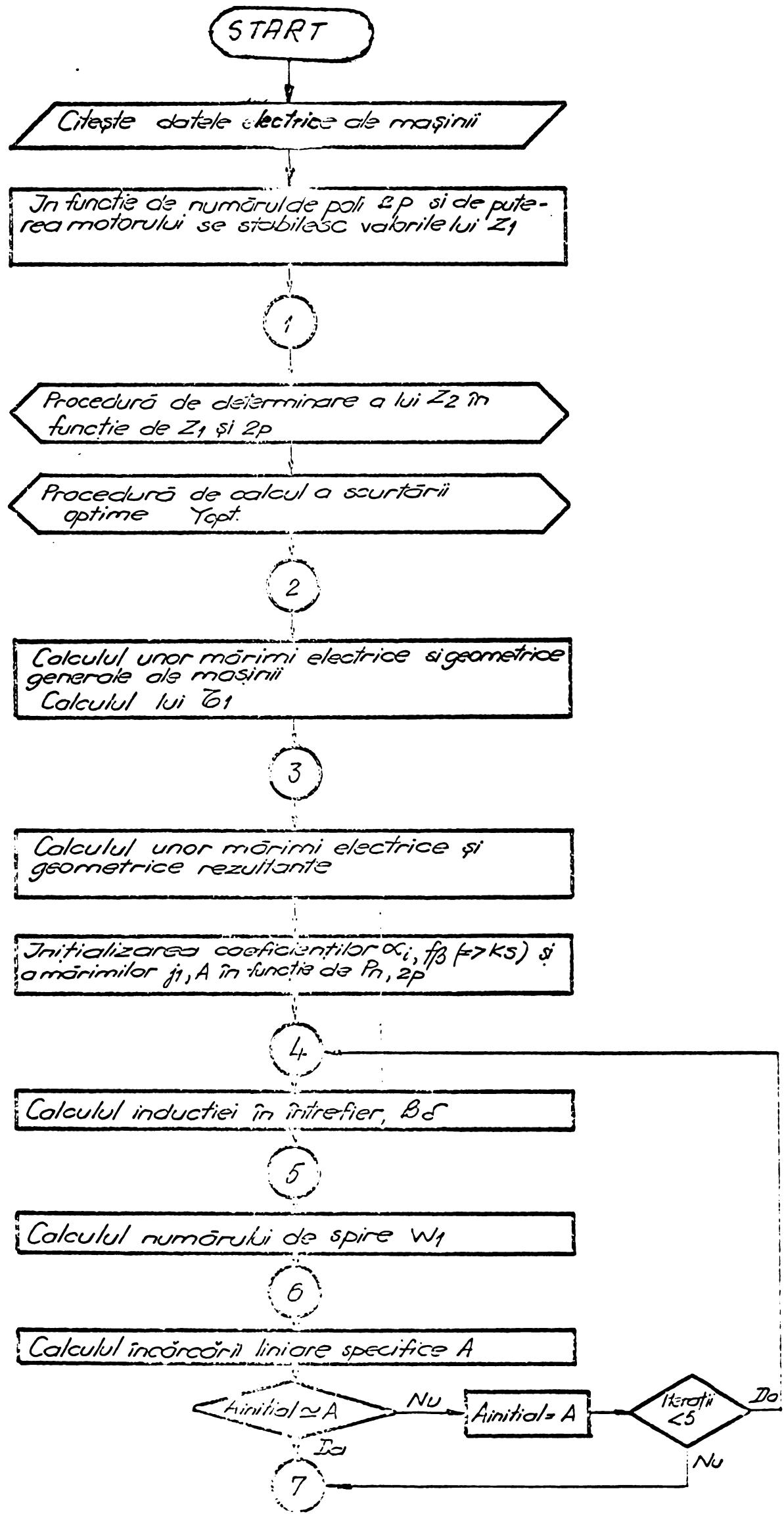
SEF SERV FINANCIAR
Tomici Vasile

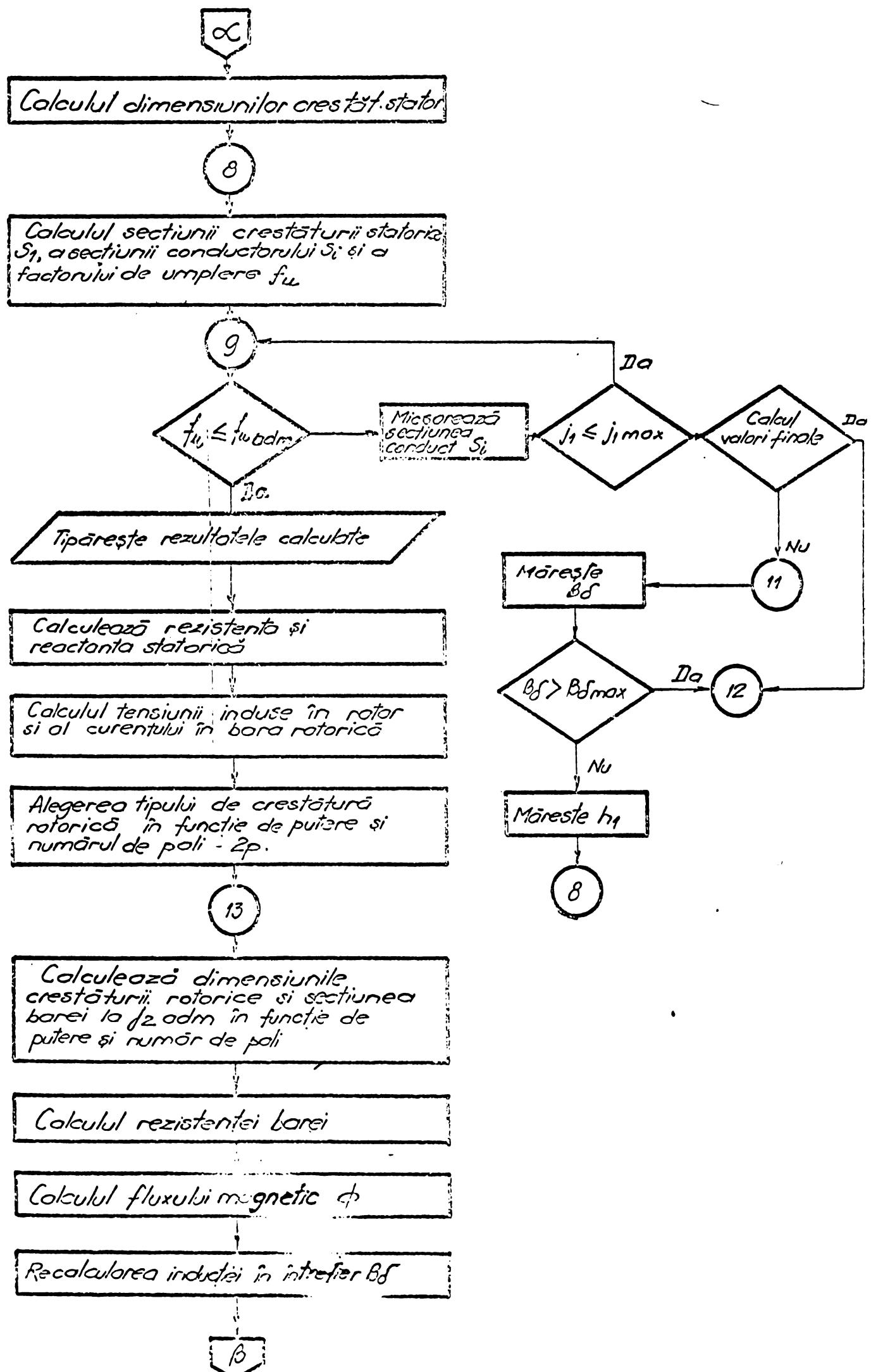
POSTCALCUL

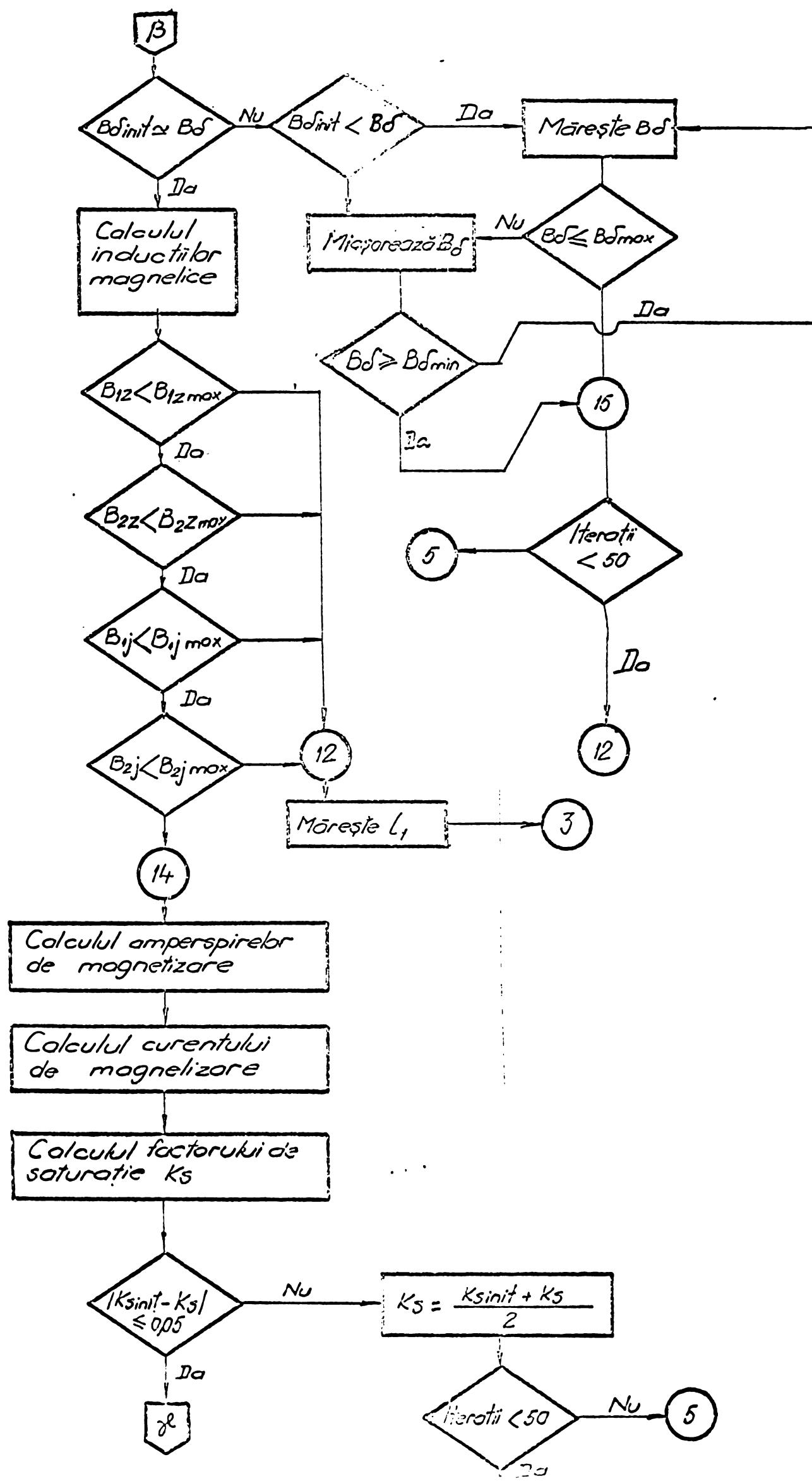
ANEXA N. 8

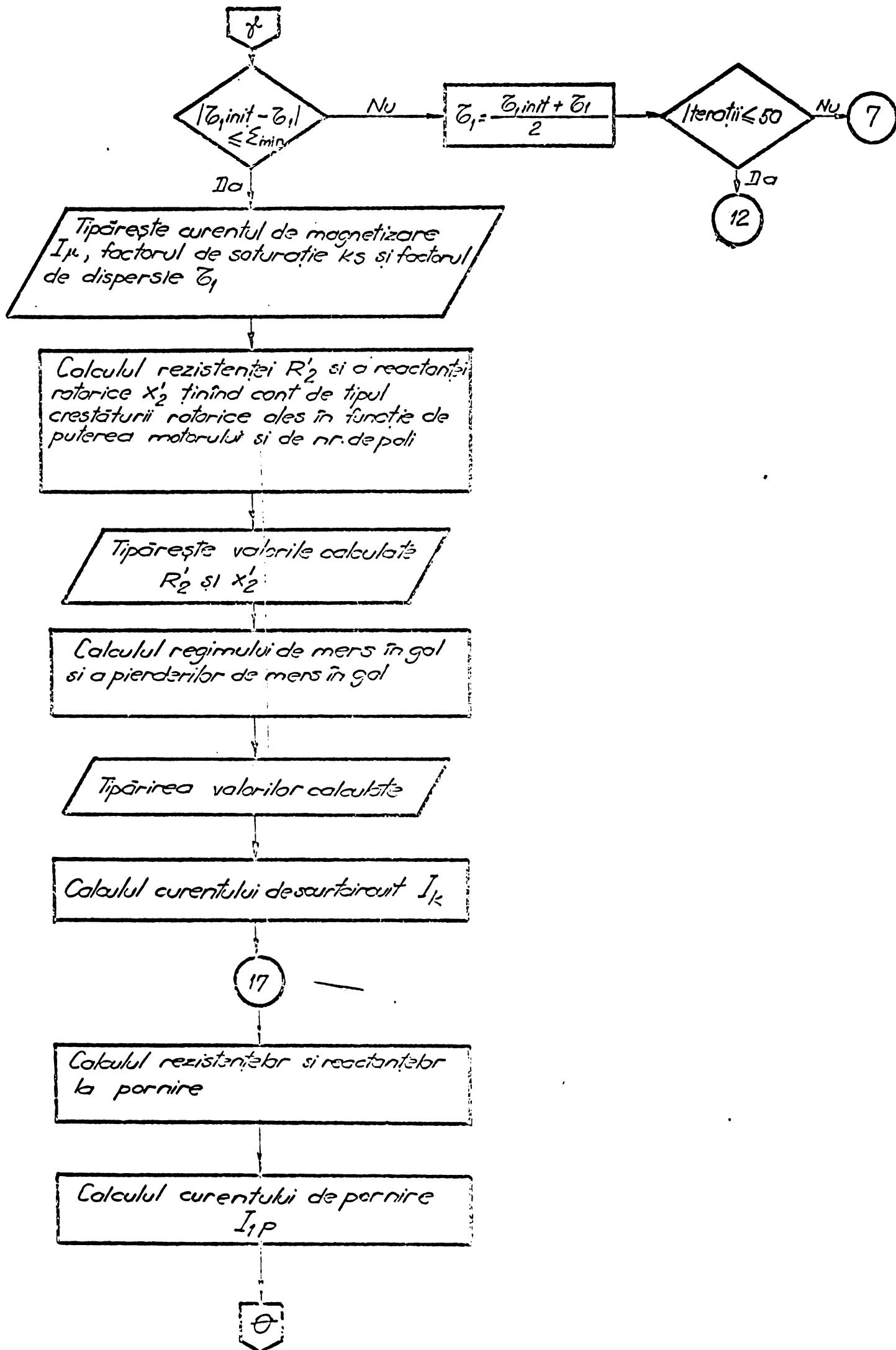
SCHERMA LOGICA BLOC A PROGRAMUARI - PRIMO

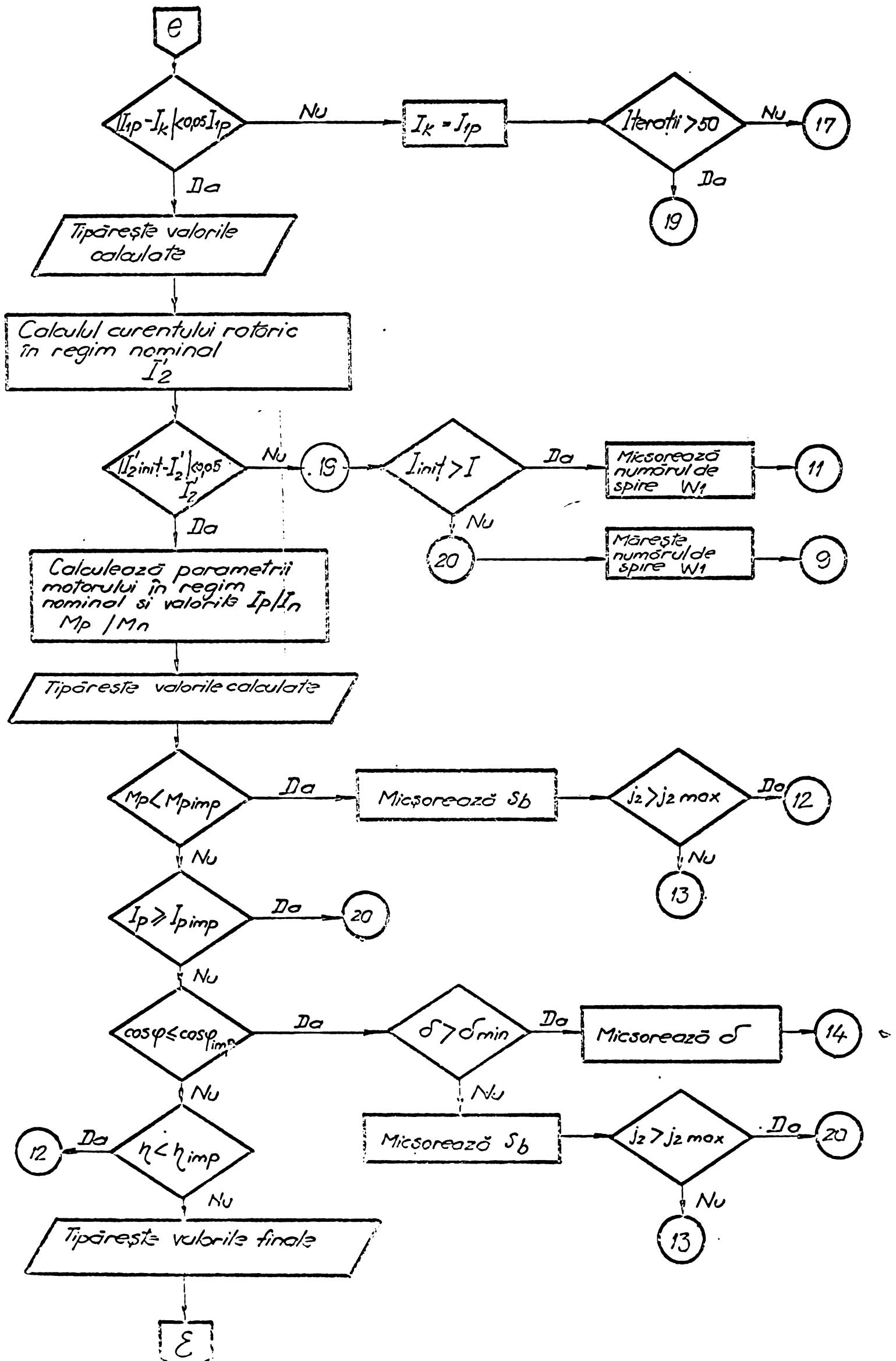
6 pagini

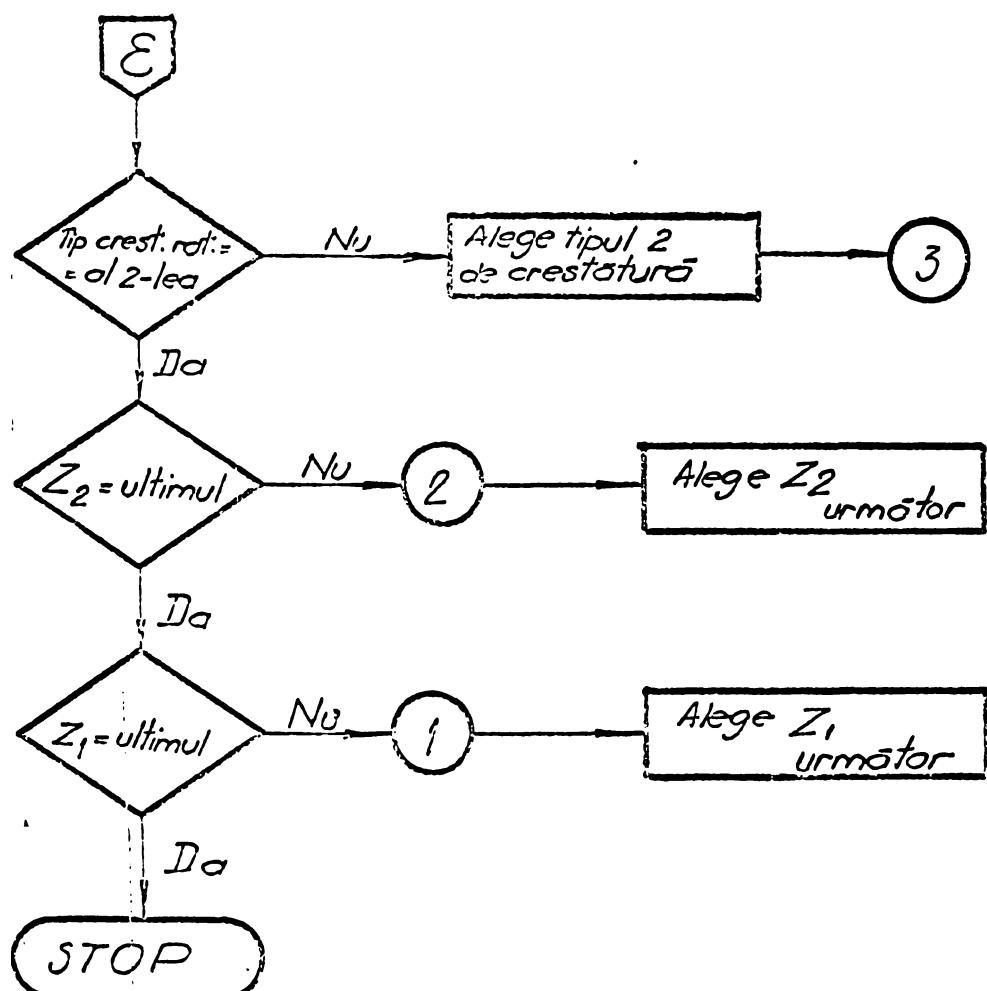












ANEXA 9

**EXPLICITAREA RELATIILOR PENTRU FUNCTIA
OBIECTIV**

8 pagini

Componentele funcției de cost, definite la pagina 128 au următoarele expresii

Costul miezului magnetic (C_{Fe})

$$C_{Fe} = (\kappa_1 + \kappa'_1) [D_{Si} + 2(h_s + h_{ij})]^2 \cdot L_p \quad [\text{lei}] \quad (200)$$

unde

$$\kappa_1 = \gamma_{Fe} C_{Fe} \quad [\text{lei}/\text{m}^3]$$

$\gamma_{Fe} = 7,85 \cdot 10^3$ - masă specifică a benzii silicioase kg/m^3

$C_{Fe} = 12,05 \text{ lei/kg}$ - costul unui Kg . de bandă silicioasă

$$\kappa'_1 = \gamma_{Fe} \cdot C_{PFe} \frac{1}{G_{Fe}} \quad [\text{lei}/\text{m}^3]$$

$[C_{PFe}] = \text{lei}$ - costul mediu, pe gaborit, a prelucrării miezului magnetic.

$[G_{Fe}] = \text{kg}$ - masă medie, pe gaborit, a miezului magnetic

Obs. Costul miezului magnetic este proporțional cu pătratul în care se înscrie cercul tolei stator, pătrat din care se decupează tola.

Trecind la variabilele independente putem scrie

$$C_{Fe} = (\kappa_1 + \kappa'_1) [\gamma_1 + 2(\gamma_3 + \gamma_5)]^2 \cdot \gamma_2 \quad [\text{lei}] \quad (204)$$

Costul înfășurării statorului ($C_{Cu+iz.}$)

Costul înfășurării statorului are la rîndul lui două componente: costul cuprului și costul izolației.

Costul cuprului este egal cu volumul acestuia amplificat cu costul materialului și monoperei se

unitatea de volum.

$$C_{Cu} = V_{Cu} \cdot (k_2 + k'_2)$$

$$V_{Cu} = S_{Cu} \cdot l_{Cu} = Z_1 \frac{\pi}{4} f_{lu} \cdot k_{dc} S_{inet} [(L_p + 0,02) + 1,3 \frac{\pi}{2p} (D_{si} + 2h_s)] [m^3]$$

unde:

$k_{dc} = \left(\frac{d_c}{d_{ciz.}} \right)^2$ - pătratul raportului diometrelor conductorului neizolat și izolat.

f_{lu} = factorul de umplere al crestăturii

$L_p + 0,020$ - lungimea rectilinie a mănușchiului de conductori dintr-o crestătură.

$1,3 \frac{\pi}{2p} (D_{si} + 2h_s)$ - lungimea frontală a capătului de bobină.

$$k_2 = \gamma_{Cu} \cdot \lambda_{Cu} [lei / m^3]$$

$\gamma_{Cu} = 8,9 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ - masa specifică a cuprului

$c_{Cu} \approx 90 \text{ lei/Kg}$ - costul unui Kg. de conductor din cupru.

$$k'_2 = \gamma_{Cu} \cdot c_{pcu} \cdot \frac{1}{G_{Cu}} \text{ lei/m}^3$$

$[c_{pcu}]$ = lei - costul mediu al manoperei de bobinoj pe gaborit.

$[G_{Cu}]$ - kg. - masa medie, pe gaborit, a cuprului din înfășurarea statorică.

Întrucât manopera de bobinoj este direct proporțională cu numărul de conductori din crestătură, von intro-

- 3 -

duce în relație numărul de conductori activi - (N_c)

Având în vedere că

$$f_{lu} S_{net} = N_c \cdot c_p \cdot d_{ciz}^2$$

unde

c_p = numărul de conductori elementari în paralel;
putem scrie

$$k_2' Z_1 \frac{\pi}{4} k_{dc} f_{lu} S_{net} = k_2' Z_1 \frac{\pi}{4} k_{dc} d_{ciz}^2 \cdot c_p N_c$$

deci

$$C_{Cu} = \left(k_2 Z_1 \frac{\pi}{4} f_{lu} k_{dc} S_{net} + k_2' Z_1 \frac{\pi}{4} k_{dc} d_{ciz}^2 \cdot c_p N_c \right) \cdot$$

$$\cdot \left[[L_p + k_3] + k_4 \frac{\pi}{2p} (D_{Si} + 2h_s) \right] \quad [\text{lei}]$$

notăm.

$$K_1 = f_{lu} \cdot k_{dc}$$

$$K_2 = k_{dc} d_{ciz}^2 \cdot c_p$$

$K_3 \Rightarrow$ reprezentă lungimea axială a capetelor de bobină

$K_4 \Rightarrow$ coeficient care ține seama de curbură capetelor de bobine.

Pentru motoare trifazate din gabaritele 160÷200 cu $2p = 4$ și în cazul statorului bobinat înainte de presare în carcăsa ovem

$$K_3 \approx 0,020 \text{ m}$$

după [75]

$$K_4 \approx 1,3$$

$$K_5 = K_4 \frac{\pi}{2p}$$

Costul izolației (C_{iz})

$$z = k_3 \cdot V_{iz}$$

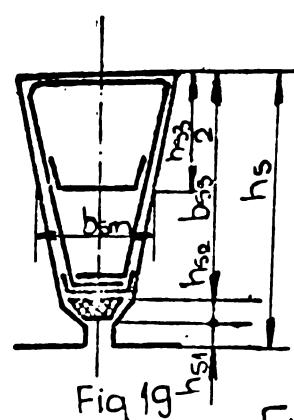


Fig 1g

[lei]

k_3 - costul în lei a unității de volum din izolația crestăturilor.

$$k_3 = \gamma_{iz} \cdot c_{iz} \quad [\text{lei/m}^3]$$

$[\gamma_{iz}] = \text{Kg/m}^3$ - masa specifică a izolației crestăturii.

$[c_{iz}] = \text{lei/Kg}$ - costul unui Kg. de izolație

$$V_{iz} = \Delta_{iz} \cdot S_{iz} \quad [\text{m}^3]$$

$[\Delta_{iz}] = \text{m}$ - grosimea izolației

$[S_{iz}] = \text{m}^2$ - suprafața izolației celor Z_i crestături, a izolațiilor între faze, între straturi și sub pană.

$$S_{iz} = k_6 Z_i (2h_s + 5 b_{sm}) \left(\frac{L_{tc}}{L_p} \right) L_p \quad [\text{m}^2]$$

$$b_{sm} = \frac{S_{cr}}{h_s - h_{s1} - h_{s2}} \approx \frac{k_{iz} S_{net}}{h_s - h_{s1} - h_{s2}} \Rightarrow \text{este lățimea me-}$$

die a crestăturii statorice; h_{s1} - înălțimea istmului crestăturii; h_{s2} - înălțimea zonei penelor de închidere. A se vedea fig. 19

L_{tc} - lungimea tecii izolante

$k_6 = \frac{S_{izt}}{S_{izer}}$ - pseudoconstanta ce ține seama de

ponderea izolației între faze în raport cu izolația crestăturii.

$$k_{iz} = \frac{S_{cr}}{S_{net}} \approx 1,2$$

$$S_{iz} \approx k_6 Z_i (2h_s + 6 \frac{S_{net}}{h_s}) \left(\frac{L_{tc}}{L_p} \right) \quad [\text{mm}^2]$$

sau

$$S_i \leq \left(h_s + 3 \frac{S_{\text{net}}}{h_s} \right) L_p \text{ unde } K_7 = 2 \cdot K_6 \left(\frac{L_{tc}}{L_p} \right) Z_1 \quad [\text{f.d}]$$

3b este motoare trifazate, cu $2p=4$ și infășurare straturi $K_6 \approx 1,28$ iar $\frac{L_{tc}}{L_p} \approx 1,2$

$$= k_3 K \left(h_s + 3 \frac{S_{\text{net}}}{h_s} \right) L_p \quad [\text{lei}]$$

$$C_{Cu} = \frac{\pi}{4} \cdot \left[K_1 S_{\text{net}} + k_2' K_2 H_c \right] \left[(L_p + K_3) + K_5 (D_{bi} + 2h_s) \right] + \\ + K_7 \Delta_{iz} \left(h_s + 3 \frac{S_{\text{net}}}{h_s} \right) L_p \quad [\text{lei}] \quad (201)$$

trecând la variabilele independente

$$C_{Cu+iz} = \frac{\pi}{4} Z_1 \left(k_2 K_1 y_4 + k_2' K_2 y_{10} \right) \left[(y_2 + K_3) + K_5 (y_1 + 2y_3) \right] + \\ + k_3 K_7 \Delta_{iz} \left(y_3 + 3 \frac{y_4}{y_3} \right) y_2 \quad [\text{lei}] \quad (205)$$

Costul coliviei din aluminiu (C_{AL})

Se compune din: costul aluminiului din barele celor 2 colivii (C_{cv}) plus costul aluminiului din inelele de sc. circuitare (C_{in}) la care se adaugă costul monoperei de turnare a coliviei (C_{mt}), cost proporțional cu volumul rotorului.

$$C_{AL} = K_8 (C_{cv} + C_{in} + C_{mt}) \quad [\text{lei}]$$

Obs: Pseudoconstanta K_8 ține seama de cripioarele de răcire de culee și reteaua de turnare care nu pot fi exprimate în funcție de y

$$K_8 = \frac{G_{AL}}{G_{cv} + G_{in}} \quad \begin{cases} K_8 = 1,4 \text{ la consum tehnologic [f.d]} \\ K_8 = 1,06 \text{ la consum net} \end{cases}$$

$$C_{cv} = k_4 Z_2 (S_{brp} + S_{brl}) \cdot L_p$$

unde

$$k_4 = \gamma_{AL} \cdot C_{AL} \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad \left[\frac{\text{lei}}{\text{kg}} \right] \quad [\text{lei/m}^3]$$

$$\rho_{AL} = 2,7 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3 \quad [\text{kg/m}^3]$$

$C_{AL} \approx 15$ - prețul per kg. al aluminiului - tip A.7. [lei/kg]

$$C_{in} = k_4 S_{2i} \cdot L_i$$

întrucât

$$j_{2i} \approx \frac{1}{2} j_{2b}$$

și

$$j_{2i} = \frac{j_{2b}}{2 \sin \frac{\pi p}{Z_2}} \Rightarrow \frac{j_{2b}}{2 S_{2i} \sin \frac{\pi p}{Z_2}} = \frac{1}{2} \frac{j_{2b}}{S_{2b}}$$

$$S_{2i} = \frac{S_{2b}}{\sin \frac{\pi p}{Z_2}} = \frac{S_{brp} + S_{brl}}{\sin \frac{\pi p}{Z_2}}$$

$$L_i = 2 [\pi (D_{si} - h_r)]$$

Pentru a introduce în funcție obiectiv variabila $x_1 = y_g$, scriem pornind de la relația

$$b_B = \left(\frac{X_{ic}}{R_{ic}} \right)_{adm} = \frac{r_p \cdot x_1}{(r_p + r_l) r_l} ; \quad r_p + r_l = \frac{r_p}{b_B r_l} x_1$$

$$\rho_{Al75^\circ} L_p \left(\frac{1}{S_{brp}} + \frac{1}{S_{brl}} \right) = \frac{1}{b_B} \frac{S_{brl}}{S_{brp}} x_1$$

$$S_{brp} + S_{brl} = \frac{1}{b_B \rho_{Al75^\circ}} \frac{S_{brp} S_{brl} S_{brl}}{S_{brp} \cdot L_p} \cdot x_1 = \\ = \frac{1}{\rho_{Al75^\circ} b_B} \cdot \frac{S_{brl}^2}{L_p} \cdot x_1$$

notăm

$$K_g = \frac{2 \pi}{\sin \frac{\pi p}{Z_2}} \cdot \frac{1}{b_B \rho_{Al75^\circ}} \quad [m/\Omega \text{mm}^2]$$

Potem scrie

$$C_{in} = k_4 K_g \frac{S_{brl}^2}{L_p} \cdot x_i (D_{si} - h_r) \quad [lei]$$

Costul manoperei de turnare a coliviei (C_{mt})

$$C_{mt} = k'_4 \cdot \frac{\pi}{4} D_{si}^2 L_p \quad [lei]$$

$$k'_4 = \delta_{Al} \cdot C_{PAL} \cdot \frac{1}{G_{Al}} \quad [lei/m^3]$$

C_{PAL} - costul mediu, pe gaborit, al manoperei de turnare a coliviei rotorice

- în cazul nostru $C_{PAL} = 1,85$ lei

G_{Al} - masă medie, pe gaborit, a coliviei; $G_{Al} = 7,95$ kg

Avem deci:

$$C_{Al} = K_8 \left\{ k_4 Z_2 (S_{brp} + S_{brl}) L_p + k_4 K_g \frac{S_{brl}^2}{L_p} x_i (D_{si} - h_r) + k'_4 \frac{\pi}{4} D_{si}^2 L_p \right\} \quad [lei] \quad (202)$$

trecind la variabilele independente, rezultă:

$$C_{Al} = k_8 \left\{ k_4 Z_2 (y_6 + y_7) + k_4 K_g \frac{y_7^2}{y_2} \cdot y_8 (y_1 - y_8) + k'_4 \frac{\pi}{4} y_1^2 y_2 \right\} \quad [lei] \quad (206)$$

Costul părților constructive (carcasa, scuturi, arbore)

Obs: Dintr-o serie de măsurători s-a stabilit că prețul părților constructive (P_{cs}) este proporțional cu volumul miezului magnetic al statorului, k_{10} fiind factorul de proporționalitate. Pentru cazul nostru $K_{10} = 1,4$

$$C_c = k_{10} (k_5 + k'_5) \left\{ \frac{\pi}{4} [D_{si} + 2(h_s + h_{ij})]^2 \cdot \frac{\pi}{4} D_{si}^2 \right\} L_p \quad [lei] \quad (203)$$

$$k_5 = \delta_{Fe} C_{F0} \quad [lei/m^3] \Rightarrow K_5 = 7,85 \cdot 10^3 \cdot 8,6 = 67,5 \cdot 10^3 \quad [lei/m^3]$$

$$\delta_{Fe} = 7,85 \cdot 10^3 \quad [kg/m^3] \quad [Kg/m^3]$$

$c_{F_0} \approx 8,6 \Rightarrow$ costul mediu ponderat al metalelor (otel și fontă) constitutive ale părților constructive [lei/kg]

$$k'_5 = \alpha_{Fe} \cdot c_{Pc} \cdot \frac{1}{G_C} \quad k'_5 \approx 1,96 \cdot 10^3 \left[\frac{\text{lei}}{\text{m}^3} \right]$$

c_{Pc} - costul mediu, pe gaborit, a prelucrării părților constructive ; în acest caz $c_{Pc} \approx 22,5$ [lei]

G_C - masa părților constructive ; în cazul nostru $G_C \approx 100$ [kg]

trecind la variabilele independente avem :

$$C_C = K_{10} (k_5 + k'_5) \left\{ \frac{\pi}{4} [y_1 + 2(y_3 + y_5)]^2 - \frac{\pi}{4} y_1^2 \right\} \quad [\text{lei}] \quad (207)$$

Funcția obiectiv are în final, expresia (generală) :

$$\begin{aligned} F(Y) = & (k_1 + k'_1) [y_1 + 2(y_3 + y_5)]^2 y_2 + \frac{\pi}{4} z_1 (k_2 k_1 y_4 + k'_2 k_2 y_{10}) \cdot \\ & \cdot [(y_2 + k_3) + k_5 (y_1 + 2y_3)] + k_3 k_7 \Delta iz (y_3 + 3 \frac{y_4}{y_3}) + k_8 [z_2 k_4 (y_6 + y_7) y_2 + \\ & + k_4 k_9 \frac{y_7^2}{y_2} y_9 (y_1 - y_8) + k'_4 \frac{\pi}{4} y_1^2 y_2 + k_{10} (k_5 + k'_5) \frac{\pi}{4} [(y_1 + 2y_3 + 2y_5)^2 - y_1^2]] \end{aligned} \quad [\text{lei}] \quad (208)$$

Obs: Pentru cazul concret ales ca exemplu la aplicarea metodei elaborate, valoarele numerice ale constantelor și pseudoconstantelor de mai sus precum și ale altora ce intervin în program, sunt redate la pagina 183 ÷ 185'

ANEXA 10

**EXPLICITAREA RELATIILOR PARAMETRILOR
FIZICI**

17 pagini

Rezistență ohmică, pe fază, a înfășurării statorice,
în stare practic rece

$$R_{120^\circ} = \rho_{Cu\ 20^\circ} \frac{2(L_p + L_{ifm})w_1}{a_1 S_{cond. activ}} \quad [\Omega]$$

Obs: - dimensiunile liniare în [m]
- suprafață în [mm²]

unde:

$\rho_{Cu\ 20^\circ}$ = rezistivitatea cuprului la 20°C în [Ω mm²/m]

L_p = lungimea pochetului statoric, în [m]

L_{ifm} = lungimea medie a copetelor de bobină, în [m]

w_1 = numărul de spire pe fază

a_1 = numărul de căi de curent în paralel

$S_{cond. activ}$ = secțiunea conductorului activ în [mm²]

Puteam scrie:

$$w_1 = \frac{pq_1 N_c}{a_1} \quad \text{unde } q_1 = \frac{Z_1}{2pm_1}$$

deci

$$w_1 = \frac{p Z_1 N_c}{2pm_1 a_1} = \frac{Z_1 N_c}{2m_1 a_1}$$

Z_1 = numărul de creștături în stator

m_1 = numărul de faze ($m_1 = 3$ din definirea problemei)

$$S_{cond. activ} = \frac{\pi}{4} d_c^2 C_p = \frac{\pi}{4} \frac{f_{iu} S_{inet}}{N_c} \left(\frac{d_c}{d_{ciz}} \right)^2$$

unde

d_c = diametrul conductorului elementar

$$d_{ciz} = \text{idem, izolat}; \left(\frac{d_c}{d_{ciz}} \right)^2 = K_{dc}$$

C_p = numărul de conductori în paralel

$$L_{ifm} = k_4 T_y + k_3$$

$$\overline{G}_y = \frac{\pi}{2p} (D_{si} + 2h_s)$$

am notat:

$$K_4 \frac{\pi}{2p} = k_5$$

$$\left. \begin{array}{l} K_3 = 0,020 \text{ m} \\ K_4 = 1,3 \end{array} \right\} \text{pentru } 2p=4 \text{ și } \text{oazul statorului bobinat înainte de presare în carcasa} \quad [75]$$

$$L_{1fm} = K_5 (D_{si} + 2h_s) + K_3 \quad [\text{m}]$$

$$R_{120^\circ} = \rho_{cu20^\circ} \frac{4Z_1}{2m_1 a_1^2 \pi k_{dcfiu}} \frac{2[(L_p + K_3) + K_5 (D_{si} + 2h_s)] N_c^2}{S_{\text{net}}} \quad [\Omega]$$

notăm:

$$K_{11} = \frac{Z_1}{m_1 a_1^2}$$

$$K_{12} = \frac{4}{\pi} \rho_{cu20^\circ} \frac{K_{11}}{K_1}$$

trecind la variabilele independente putem scrie

$$R_{120^\circ} = K_{12} \frac{[(y_2 + K_3) + K_5 (y_1 + 2y_3)] y_{10}^2}{y_4} \quad [\Omega]$$

Reactanța de scăpări a infășurării statorice (X_1)

[87]; [127]; [128]

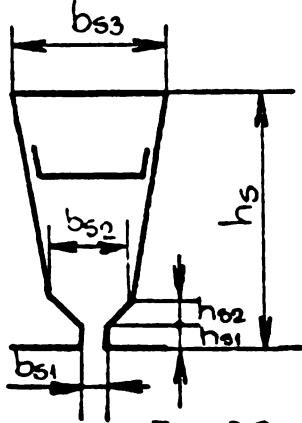
$$X_1 = 4\pi \mu_0 f_1 \frac{w_1^2}{pq_1} \cdot L_p (\lambda_{1c} + \lambda_{1d} + \lambda_{1f}) \quad [\Omega]$$

unde

λ_{1c} = permeanța geometrică de scăpări a crestăturii

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ - permeabilitatea magnetică a vidului

$$\lambda_{1c} = \frac{3y_{opt} + 1}{4} \cdot \left[\frac{h_{s1}}{b_{s1}} + \frac{2h_{s2}}{b_{s1} + b_{s2}} + \frac{2(h_s - h_{s1} - h_{s2})}{3(b_{s2} - b_{s3})} \right]$$



putem scrie:

$$\frac{b_{s2} + b_{s3}}{2} \approx \frac{S_1}{h_s - h_{s1} - h_{s2}} \approx \frac{k_{iz} S_{\text{net}}}{h_s - h_{s1} - h_{s2}}$$

$$k_{iz} \approx 1,2$$

Fig. 20

notăm

$$\frac{3Y_{opt} + 1}{4} = K_{13}$$

si deci

$$\lambda_{1c} = K_{13} \left[\frac{h_{s1}}{b_{s1}} + \frac{2h_{s2}}{b_{s1} + b_{s2}} + \frac{(h_s - h_{s1} - h_{s2})^2}{3 \cdot K_{iz} S_{inet}} \right]$$

respectiv

$$\lambda_{1c} = K_{13} \left[\frac{h_{s1}}{b_{s1}} + \frac{2h_{s2}}{b_{s1} + b_{s2}} + \frac{(y_3 - h_{s1} - h_{s2})^2}{3 \cdot K_{iz} y_4} \right]$$

λ_{1d} = permeanța scăpărilor diferențiale si la copetele dintilor

$$\lambda_{1d} = \frac{t_1 f_{1w}^2}{8,9 \cdot \delta \cdot k_g \cdot k_{sat}} = \frac{\pi D_{si} f_{1w}^2}{Z_1 8,9 \delta k_g k_{sat}}$$

unde :

f_{1w} - factorul de infășurare statoric

δ - lățimea intrefierului

k_g - coeficientul lui Carter

k_{sat} - factorul de saturatie

t_1 - pasul dentar statoric

notăm :

$$\frac{\pi f_{1w}^2}{8,9 \delta k_g k_{sat} Z_1} = K_{14}$$

si deci

$$\lambda_{1d} = K_{14} D_{si}$$

respectiv

$$\lambda_{1d} = K_{14} y_1$$

λ_{1f} = permeanța de scăpări la părțile frontale ale infășurării

$$\lambda_{1f} = 0,57 \frac{6_p}{L_p} q_1 \frac{3Y_{opt} - 1}{2}; \quad 6_p = \frac{\pi D_{si}}{2p}$$

notăm

$$0,57 \frac{\pi Z_{ii}}{4p^2 m_1} \frac{3Y_{opt} - 1}{2} = K_{15}$$

si deci :

-4-

$$= k \cdot \frac{Z_{Si}}{y_2}$$

respectiv:

$$\lambda_{1f} = K_{15} \frac{y_1}{y_2}$$

mai putem scrie:

$$4\pi \mu_0 f_1 \frac{w_1^2}{pq_1} = 4\pi \mu_0 f_1 \frac{\left(\frac{pq_1 N_c}{a_1}\right)^2}{pq_1} = 4\pi \mu_0 f_1 \frac{pq_1 N_c^2}{a_1^2}$$

$$= 4\pi \mu_0 f_1 \frac{\frac{Z_1}{2pm_1}}{a_1} N_c^2 = 2\pi \mu_0 f_1 \frac{Z_1}{m_1 a_1^2} N_c^2$$

notăm:

$$2\pi \mu_0 f_1 \frac{Z_1}{m_1 a_1} = K_{16}$$

în final avem: ($N_c = y_{10}$; $L_p = y_2$)

$$X_1 = K_{16} \cdot y_2 y_{10}^2 \left\{ K_{13} \left[\frac{h_{s1}}{b_{s1}} + \frac{2h_{s2}}{b_{s1} + b_{s2}} + \frac{(y_3 - h_{s1} - h_{s2})^2}{3.6 y_4} \right] + K_{14} y_1 + K_{15} \frac{y_1}{y_2} \right\} \quad [\Omega]$$

Rezistență ohmică a coliviei, raportată la stator (R'_{275°)

$$R'_{275^\circ} = k \left(S_{Al75^\circ} \frac{L_p}{S_{br}} + S_{Al75^\circ} \frac{\pi D_i}{Z_2 S_i} \cdot \frac{1}{2 \sin^2(\frac{\pi p}{Z_2})} \right) \quad [\Omega] \quad (233)$$

-dimensiunile liniare în [m]:

unde

$$k = \frac{4m_1 (w_1 f w_1)^2}{Z_2} \Rightarrow \text{factor de raportare}$$

$$= \frac{4m_1 w_1^2 f^2 w_1}{Z_2} = \frac{4m_1 f^2 w_1}{Z_2} \frac{Z_1^2 N_c^2}{4m_1^2 a_1^2} = \frac{Z_1^2 f^2 w_1}{Z_2 m_1 a_1^2} N_c^2$$

$$S_{br} = S_{brp} + S_{brl} \Rightarrow \text{secțiunea dublei colivii}$$

D_i = diametrul mediu al inelului de scurtcircuitare

$$D_i = D_{si} - h_g$$

cu:

$$\sin\left(\frac{\pi p}{Z_2}\right) \approx -\frac{\pi p}{Z_2}$$

$$K_{17} = \frac{Z_1^2 f^2 w_1}{Z_2 m_1 a_1^2}$$

și

$$j_{2i} = K_{18} j_{2b}$$

$$K_{18} = 0,5 \div 0,8$$

$$j_{2b} = \frac{j_{2b}}{S_{br}}$$

$$j_{2i} = \frac{j_{2i}}{S_i} \approx \frac{j_{2b}}{2 \frac{\pi p}{Z_2}} \cdot \frac{1}{S_i} = \frac{Z_2}{2 \pi p} \cdot \frac{j_{2b}}{S_i}$$

$$\frac{j_{2b}}{S_{br}} = K_{18} \frac{Z_2}{2 \pi p} \cdot \frac{j_{2b}}{S_i} \quad \times \quad S_i = K_{18} \frac{Z_2}{2 \pi p} S_{br}$$

Putem scrie:

$$R'_{275^\circ} = K_{17} N_C^2 g_{AL75^\circ} \left(\frac{L_p}{S_{brp} + S_{brl}} + \frac{\pi}{Z_2} \frac{1}{K_{18} \frac{Z_2}{2 \pi p} (S_{brp} + S_{brl}) 2 \left(\frac{\pi p}{Z_2} \right)^2} \cdot \frac{D_{si} - h_r}{\rho} \right).$$

$$= K_{17} g_{AL75^\circ} N_C^2 \left(\frac{L_p}{S_{brp} + S_{brl}} + \frac{1}{p K_{18}} \cdot \frac{D_{si} - h_r}{S_{brp} + S_{brl}} \right) \quad [Q]$$

mai notăm

$$K_{19} = \frac{1}{p K_{18}}$$

În final, trecind la variabilele independente scriem:

$$R'_{275^\circ} = K_{17} g_{AL75^\circ} Y_{10}^2 \left(\frac{Y_2}{Y_6 + Y_7} + K_{19} \frac{Y_1 - Y_8}{Y_6 + Y_7} \right) \quad [Q] \quad (234)$$

Reactanta de scăpări a coliviei rotunice raportată
la stator (X'_2) [75], [97]

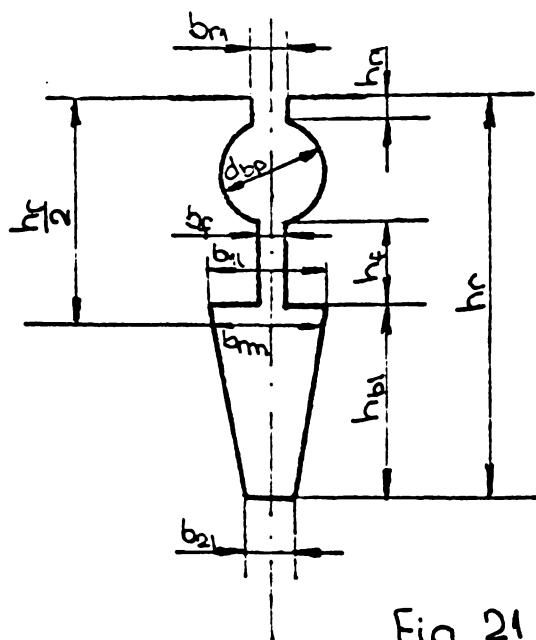


Fig. 21

Obs: S-a avut în vedere crestătura dublei colivii avind forma din figura de mai sus, cu inele de sc. circ. comune

$$X_2' = 2\pi f_1 \mu_0 L_p K \lambda_2 \quad [\Omega] \quad (235)$$

L_p - în [m]

$\lambda_2 = \lambda_{2c} + \lambda_{2d} + \lambda_{2f} \Rightarrow$ permeanță geometrică a coliviei rotorice

mai putem scrie:

$$X_2' = K X_{2c} + 2\pi f_1 \mu_0 L_p K (\lambda_{2d} + \lambda_{2f}) \quad [\Omega]$$

$$K = K_{17} N_C^2$$

Reactanță crestăturii, în regim nominal

$$X_{2c} = X_{ic} + X_{2ci} \quad ; \quad X_{2ci} = 2\pi f_1 \mu_0 L_p \frac{h_{ri}}{b_m}$$

$$X_{ic} = \frac{(r_p x_l + r_i x_p)(r_p + r_i) - r_p r_i (x_p + x_l - 2x_m)}{(r_p + r_i)^2}$$

Pentru crestătura adoptată, putem scrie:

$$x_p = K_{20} L_p \lambda_{cp} = 2,61 \cdot 10^{-4} L_p \quad K_{20} = 2\pi f_1 \mu_0 = 2\pi 50 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \quad [\Omega/m] \\ \approx 3,95 \cdot 10^{-4} \quad [\Omega/m]$$

$$x_m = k_{20} L_p \lambda_m = 3,91 \cdot 10^{-4} L_p \quad \lambda_{cp} = 0,66$$

$$\lambda_m = \frac{3}{2} \lambda_{cp} = 1,5 \cdot 0,66 = 0,99$$

Să exprimăm și pe r_p, r_i în funcție de variabilele independente

$$r_p = \rho_{AL} \frac{L_p}{S_{brp}} \quad r_i = \rho_{AL} \frac{L_p}{S_{brl}}$$

deci:

$$x_{ic} = \frac{\left(\rho_{AL} \frac{L_p}{S_{brp}} x_l + \rho_{AL} \frac{L_p}{S_{brl}} x_p \right) \left(\rho_{AL} \frac{L_p}{S_{brp}} + \rho_{AL} \frac{L_p}{S_{brl}} \right) - \rho_{AL}^2 \frac{L_p^2}{S_{brp} S_{brl}} (x_p - x_l - 2x_m)}{\left(\rho_{AL} \frac{L_p}{S_{brp}} + \rho_{AL} \frac{L_p}{S_{brl}} \right)^2}$$

$$= \frac{\left[\left(\frac{x_l}{S_{brp}} + \frac{x_p}{S_{brl}} \right) \left(\frac{1}{S_{brp}} + \frac{1}{S_{brl}} \right) - \frac{1}{S_{brp} S_{brl}} (x_l + \overbrace{x_p - 2x_m}^{\approx -2x_p}) \right] S_{brp}^2 S_{brl}^2}{(S_{brp} + S_{brl})^2}$$

$$x_{ic} = \frac{\left(\frac{x_l}{S_{brp}^2} + \frac{x_p}{S_{brp} S_{brl}} + \frac{x_l}{S_{brp} S_{brl}} + \frac{x_p}{S_{brl}^2} - \frac{x_l}{S_{brp} S_{brl}} + \frac{2x_p}{S_{brp} S_{brl}} \right) S_{brp}^2 S_{brl}^2}{(S_{brp} + S_{brl})^2} = \\ = \frac{x_p S_{brp}^2 + 3x_p S_{brp} S_{brl} + S_{brl}^2 x_l}{(S_{brp} + S_{brl})^2}$$

trecind la variabilele independente, avem

$$x_{ic} = \frac{x_p y_6^2 + 3x_p y_6 y_7 + y_7^2 y_9}{(y_6 + y_7)^2} \quad [52]$$

$$x_{2c} = x_{ic} + x_{2cl} = x_{ic} + k_{20} y_2 \frac{h_{r1}}{br_1} \quad [52]$$

Obs: în cazul crestături adoptate avem:

$$x_{ic} = \frac{2,61 \cdot 10^{-4} y_2 y_6^2 + 7,83 y_2 y_6 y_7 + y_7^2 y_9}{(y_6 + y_7)^2} \quad [52]$$

Permeanța scăpărilor diferențiale și la capetele dintilor [127]

$$\lambda_{2d} = \frac{t_2}{8,9 \delta k_g k_{sat}} = \frac{\pi D_{si}}{8,9 Z_2 \delta k_g k_{sat}}$$

k_g = coeficientul lui Carter

k_{sat} = factorul de saturatie

$$\frac{\pi}{8,9 Z_2 \delta k_g k_{sat}} = k_{21}$$

scriem:

$$\lambda_{2d} = k_{21} D_{si}$$

$$\lambda_{2d} = k_{21} y_1$$

Permeanța de scăpări a părților frontale a coliviei

$$\lambda_{2f} = k_{f2} \frac{Z_2 l_{21}}{2p \cdot L_p}$$

$$k_{f2} = 0,8 \div 0,9$$

l_{21} = partăinea care ieșe din crestătura a barei motorice
am considerat $l_{21} = b_i$; unde b_i = lățimea inelului circular

$$\lambda_{2f} \approx 0,9 \frac{Z_2 b_i}{4p L_p}$$

$$b_i = \frac{S_i}{1,2 h_r} = k_{18} \frac{Z_2}{2\pi p} \frac{S_{br}}{1,2 h_r} = k_{18} \frac{Z_2}{2,1,2 \pi p} \frac{S_{brp} + S_{brl}}{h_r}$$

$$\lambda_{2f} = 0,9 k_{18} \frac{Z_2^2}{8,1,2 p^2} \cdot \frac{S_{brp} + S_{brl}}{L_p \cdot h_r}$$

notăm

$$0,9 k_{18} \frac{Z_2^2}{8,1,2 p^2} = k_{22}$$

și avem

$$\lambda_{2f} = k_{22} \frac{S_{brp} + S_{brl}}{L_p \cdot h_r}$$

iar în variabile curente:

$$\lambda_{2f} = k_{22} \frac{y_6 + y_7}{y_2 \cdot y_8}$$

Putem scrie deci:

$$x'_2 = k_{17} y_{10}^2 \left[\frac{x_p y_6^2 + 3x_p y_6 y_7 + y_7^2 y_9}{(y_6 + y_7)^2} + k_{20} y_2 \frac{h_{r1}}{b_m} + k_{20} k_{21} y_1 y_2 + k_{20} k_{22} \frac{y_6 + y_7}{y_8} \right] \quad [52] (236)$$

Reactanță statorică, tinând seama de saturatia cailor de dispersie (x'_{1s})

$$x_{1s} = 4\pi \mu_0 f_1 \frac{w_1^2}{pq_1} L_p (\lambda_{1cs} + \lambda_{1ds} + \lambda_{1f}) \quad [52] (238)$$

unde λ_{1cs} și λ_{1ds} reprezintă permeanța crestăturii și permeanța de scăpări la capetele dintilor afectate de saturatie [127]

$$\lambda_{1cs} = \lambda_{1c} - \frac{h_{s1} + 0,58 h_{s2}}{b_{s1}} \cdot \frac{C_1}{C_1 + 1,5 b_{s1}}$$

$$\lambda_{1ds} = \lambda_g \lambda_{1d}$$

unde:

$$c_1 = (t_1 - b_{s1})(1 - \chi_g)$$

χ_g = caracterizează raportul dintre fluxul de scăpari din intăfier, cu și fără saturatie; este dat în curbe $f(B_{Sg})$

Tinind seama și de (232) putem scrie

$$X_{15} = k_{16} Y_2 Y_{10}^2 \left\{ k_{13} \left[\frac{h_{s1}}{b_{s1}} + \frac{2h_{s2}}{b_{s1} + b_{s2}} + \frac{(y_3 - h_{s1} - h_{s2})^2}{3,6 y_4} \right] - \frac{h_{s1} + 0,58 h_{s2}}{b_{s1}} \cdot \frac{c_1}{c_1 + 1,5 b_{s1}} + \chi_g k_{14} Y_1 + k_{15} \frac{Y_1}{Y_2} \right\} \quad [\Omega] \quad (238)$$

Reactanta rotorică raportată la stator, tinind seama de saturatie și de refularea curentului (X'_{25})

[97]

Obs: La pornire neglijăm x_p și x_m în raport cu x_l

$$X'_{25} = K X_{2cs} + 2\pi \mu_0 f_1 K L_p (\chi_g \lambda_{2d} + \lambda_{2f}) \quad [\Omega] \quad (239)$$

$$X_{2cs} = X_{2ip} + X_{2cl}$$

$$X_{ip} = \frac{r_p^2 x_l}{(r_p + r_i)^2 + x_l^2} = \frac{\rho_{Al20^\circ}^2 S_{brp}^2 L_p^2 x_l}{\rho_{Al20^\circ}^2 L_p^2 \left(\frac{1}{S_{brp}} + \frac{1}{S_{brl}} \right)^2 + x_l^2} = \\ = \frac{\rho_{Al20^\circ}^2 L_p^2 S_{brl}^2 x_l}{\rho_{Al20^\circ}^2 L_p^2 (S_{brp} + S_{brl})^2 + S_{brp}^2 S_{brl}^2 x_l^2}$$

în variabile curente

$$X_{ip} = \frac{\rho_{Al20^\circ}^2 Y_2^2 Y_7^2 Y_9^2}{\rho_{Al20^\circ}^2 Y_2^2 (Y_6 + Y_7)^2 + Y_6^2 Y_7^2 Y_9^2}$$

Tinind seama și de (236) putem scrie:

$$x'_{2s} = K_{17} Y_{10}^2 \left[\frac{\rho_{Al20^\circ}^2 y_2^2 y_7^2 y_9}{\rho_{Al20^\circ}^2 y_2^2 (y_6 + y_7)^2 + y_6^2 y_7^2 y_9^2} + K_{20} y_2 \frac{h_{r1}}{b_{r1}} + K_{20} K_{21} y_g y_1 y_2 + K_{20} K_{22} \frac{y_6 + y_7}{y_8} \right] \quad [\Omega] (240)$$

Rezistență ohmică a coliviei, raportată la stator, tînind seama de refularea curentului (R'_{2r})

$$R'_{2r} = K \left[R_{2rb} + \rho_{Al20^\circ} \frac{\pi D_i}{Z_2 S_i} \cdot \frac{1}{2 \sin^2(\frac{\pi p}{Z_2})} \right] \quad [\Omega] (241)$$

Obs: La pornire neglijăm x_p și x_m în raport cu x_l

$$\begin{aligned} R_{2rb} = R_{ip} &\approx \frac{r(r_p + r_l) + x_l^2}{(r_p + r_l)^2 + x_l^2} r_p = \frac{\rho_{Al20^\circ}^2 L_p^2 \left(\frac{1}{S_{brp}} + \frac{1}{S_{brl}} \right) \frac{1}{S_{brl}} + x_l^2}{\rho_{Al20^\circ}^2 L_p^2 \left[\frac{1}{S_{brp}} + \frac{1}{S_{brl}} \right]^2 + x_l^2} \rho_{Al20^\circ} L_p \frac{1}{S_{brp}} \\ &= \frac{\rho_{Al20^\circ}^3 L_p^3 (S_{brp} + S_{brl}) + \rho_{Al20^\circ} L_p S_{brp} S_{brl}^2 x_l^2}{\rho_{Al20^\circ}^2 L_p^2 (S_{brp} + S_{brl})^2 + S_{brp}^2 S_{brl}^2 x_l^2}. \end{aligned}$$

trecind la variabilele independente:

$$R_{2rb} = \frac{\rho_{Al20^\circ}^3 y_2^3 (y_6 + y_7) + \rho_{Al20^\circ} y_2 y_7^2 y_9^2}{\rho_{Al20^\circ}^2 y_2^2 (y_6 + y_7)^2 + y_6^2 y_7^2 y_9^2}$$

Tinind seama și de (234) putem scrie:

$$R'_{2r} = K_{17} Y_{10}^2 \left[\frac{\rho_{Al20^\circ}^3 y_2^3 (y_6 + y_7) + \rho_{Al20^\circ} y_2 y_6 y_7^2 y_9^2}{\rho_{Al20^\circ}^2 y_2^2 (y_6 + y_7)^2 + y_6^2 y_7^2 y_9^2} + \rho_{Al20^\circ} K_{19} \frac{y_1 - y_8}{y_6 + y_7} \right] \quad [\Omega] (242)$$

Pierderile în fier (P_{Fe}) [127]

$$P_{Fe} = P_{ij} + P_{id} \left[1 + 2 \sqrt{t_1 (k_g - 1)^3} \right] \quad [W] (243)$$

unde:

$$P_{ij} = K_{1j} p_{ij} G_{ij} \quad [W]$$

$$P_{id} = K_{1d} p_{id} G_{id} \left[1 + 2 \sqrt{t_1 (k_g - 1)^3} \right] \quad [W]$$

$$\left. \begin{array}{l} K_{1j} = 1,5 \\ K_{1d} = 1,8 \end{array} \right\} \text{coeficienti determinati experimental}$$

$P_{1j}, P_{1d} \Rightarrow$ pierderile specifice, in [w/kg], corespunzatoare inductiilor din jug, respectiv dinti

valorile lui P_{1j} si P_{1d} se iau din tab 4 (anexa 11)
 $f(B_{1j})$ si respectiv $f(B_{1d})$;
 B_{1j} si B_{1d} rezulta din subrutina MAGNET

G_{1j}, G_{1d} - masa jugului statoric respectiv a dintilor

K_g - coeficientul lui Carter

$$t_1 = \frac{\pi D_{si}}{Z_1}$$

Putem scrie:

$$P_{Fe} = K_{1j} P_{1j} \gamma_{Fe} K_{1Fe} \left\{ \frac{\pi}{4} [(D_{si} + 2h_s + 2h_{1j})^2 - (D_{si} + 2h_s)^2] L_p \right\} + \\ + K_{1d} P_{1d} \gamma_{Fe} K_{1Fe} Z_1 \left[\frac{\pi (D_{si} + 2h_s)}{Z_1} - \frac{K_{iz} S_{inet}}{h_s} \right] L_{phs} \left[1 - 2 \sqrt{(k_g - 1) \frac{3\pi}{Z_1} \sqrt{D_{si}}} \right]$$

notam:

$$K_{23} = \gamma_{Fe} \cdot K_{1Fe} ; \quad \gamma_{Fe} = \text{masa specifica} \quad [kg/m^3] \\ K_{1Fe} = \text{coeficientul de umplere} \quad [K_{1Fe} \approx 0,95] \\ K_{24} = \frac{K_{iz}}{Z_1} \quad K_{iz} = \text{raportul dintre sectiunea brută si netă} \\ \text{a crestăturii}$$

$$K_{25} = 2 \sqrt{(k_g - 1) \frac{3\pi}{Z_1}} \quad \text{pentru } \Delta_{iz} = 0,25 \cdot 10^{-3} [m]; K_{iz} \approx 1,2$$

$$P_{Fe} = K_{1j} P_{1j} K_{23} [\pi (y_1 y_5 + 2 y_3 y_5 + y_5^2)] y_2 + K_{1d} P_{1d} K_{23} [\pi (y_1 + 2 y_3) - K_{24} \frac{y_4}{y_3}] \cdot \\ \cdot [1 - K_{25} \sqrt{y_1}] \cdot y_2 y_3 \quad [w] \quad (244)$$

Pierderile in infasurarea rotorica (P_{AI}) [127]

$$P_{AI} = Z_2 R_{2\pi_3} I_{2b}^2 \quad [w] \quad (245)$$

$$R_{275^\circ} = \rho_{Al75^\circ} \left[\frac{y_2}{y_6 + y_7} + K_{19} \frac{y_1 - y_8}{y_6 + y_7} \right]$$

I_{2b} = curentul în bara rotorică

$$I_{2b} = \frac{K_{rot} P_N}{Z_2 E_{2b}} ; \quad K_{rot} = f(\eta) - este dat în curbe$$

E_{2b} = t.e.m. indușă în bară

$$E_{2b} = \frac{f_{w_2 w_2}}{f_{w_1 w_1}} \cdot U_{if} \frac{1}{1 + \zeta_1} = \frac{U_{if} \frac{1}{1 + \zeta_1}}{2 w_1 f_{w_1}}$$

$$I_{2b} = \frac{K_{rot} P_N 2 w_1 f_{w_1}}{Z_2 U_{if} \frac{1}{1 + \zeta_1}} = \frac{K_{rot} P_N f_{w_1} 2P \frac{Z_1}{2pm}}{Z_2 U_{if} \frac{1}{1 + \zeta_1} \alpha_1} \quad N_C = K_b \cdot N_C$$

$$I_{2b}^2 = k_b^2 y_{10}^2$$

$$k_b^2 = \frac{K_{rot}^2 P_N^2 f_{w_1}^2 Z_1^2 (1 + \zeta_1)^2}{Z_2^2 U_{if}^2 m_1^2 \alpha_1^2}$$

$$P_{Al} = Z_2 k_b^2 \rho_{Al75^\circ} y_{10}^2 \left[\frac{y_2}{y_6 + y_7} + K_{19} \frac{y_1 - y_8}{y_6 + y_7} \right] \quad [W]$$

notăm:

$$K_{26} = \rho_{Al75^\circ} Z_2 k_b^2$$

și avem în final:

$$P_{Al} = K_{26} y_{10}^2 \left[\frac{y_2}{y_6 + y_7} + K_{19} \frac{y_1 - y_8}{y_6 + y_7} \right] \quad [W] \quad (246)$$

$$P_{m+v} \approx K_{m+v} 2P \bar{Z}_p^3 \cdot 10^4 = K_{m+v} 2P \left(\frac{\pi D_{si}}{2P} \right)^3 \cdot 10^4 = K_{m+v} \frac{\pi^3}{4P^2} 10^4 D_{si}^3$$

[W] (249)

K_{m+v} = coeficient determinat experimental

$K_{m+v} \approx 1,9$; pentru motoare cu $2P = 4$

notăm

$$k_{27} = \frac{\pi^3}{4} 10^4 \frac{K_{m+v}}{P^2} \approx 7,752 \cdot 10^4 \frac{K_{m+v}}{P^2}$$

și scriem în variabile curente

$$P_{m+v} = K_{27} y_1^3 \quad [W] \quad (250)$$

Relații pentru calculul încălzirii după [75] ; [127]
Grosimea izolațiilor din crestătură și a stratului de aer

$$\beta_{izs} = \beta_{str} + \beta_{em_1} + \beta_{em_2} + \beta_a \quad [m] \quad (262)$$

unde :

$$\beta_{str} = 0,25 \cdot 10^{-3} \quad [m]$$

este grosimea izolației din stratifoliu (PHP)

β_{em_1} = grosimea echivalentă a izolației conductorilor
emailați (raportată la perimetrul crestăturii P_{cr})

β_{em_2} = grosimea echivalentă a lacului de impregnare din
crestătură, raportată la perimetrul crestăturii

β_a = grosimea echivalentă a stratului de aer

Potrivit scrie :

$$\beta_{em_1} = \frac{\pi d_{iz} \Delta_{iz} C_p N_c}{P_{crs}} \quad [m]$$

$$d_{ciz} = \sqrt{\frac{f_{iu} S_{inet}}{C_p N_c}}$$

$$P_{crs} = 2h_s + k_{iz} \frac{S_{inet}}{h_s} \quad ; \quad P_{crs} = 2y_3 + k_{iz} \frac{y_4}{y_3}$$

$$\beta_{em_1} = \frac{\pi \Delta_{iz} C_p N_c \sqrt{f_{iu} S_{inet} / C_p N_c}}{2h_s + k_{iz} \frac{S_{inet}}{h_s}} = \frac{\pi \Delta_{iz} \sqrt{C_p f_{iu} \sqrt{N_c S_{inet}}}}{2h_s + k_{iz} S_{inet} / h_s}$$

notind

$$k_{28} = \pi \Delta_{iz} \sqrt{C_p f_{iu}} \quad \text{și trecind la variabilele curente avem:}$$

$$\beta_{em_1} = \frac{k_{28} \sqrt{y_4 y_{10}}}{2y_3 + k_{iz} y_4 / y_3} \quad [m]$$

$$\beta_{em_2} = \frac{(1 - f_{iu}) S_{inet}}{P_{crs}} \quad [m]$$

$$\beta_{em_2} = \frac{(1 - f_{iu}) y_4}{2y_3 + k_{iz} y_4 / y_3} \quad [m]$$

$$\beta_0 = \frac{C_p N_{cdci}^2 - \frac{\tilde{x}}{4} C_p N_{cdci}^2}{P_{crs}} = \frac{(1 - \frac{\tilde{x}}{4}) f_{1U} S_{net}}{P_{crs}} = \frac{0,2146 f_{1U} S_{net}}{P_{crs}} [m]$$

$$\beta_0 = \frac{0,2146 f_{1U} Y_4}{2Y_3 + K_{i2} Y_4 / Y_3} [m]$$

$$\beta_{i2S} = \frac{\beta_{str} (2Y_3 + K_{i2} Y_4 / Y_3) + K_{28} \sqrt{Y_4 Y_{10}} + (1 - f_{1U}) Y_4 + 0,2146 f_{1U} Y_4}{2Y_3 + K_{i2} Y_4 / Y_3}$$

$$\beta_{i2S} = \frac{\beta_{str} (2Y_3^2 + K_{i2} Y_4) + K_{28} Y_3 \sqrt{Y_4 Y_{10}} + (1 - 0,7854 f_{1U}) Y_3 Y_4}{2Y_3^2 + K_{i2} Y_4}$$

notind:

$$2\beta_{str} = K_{29}$$

$$\beta_{str} K_{i2} = K_{30}$$

$$(1 - 0,7854 f_{1U}) = K_{31}$$

putem scrie:

$$\beta_{i2S} = \frac{K_{29} Y_3^2 + K_{30} Y_4 + K_{28} Y_3 \sqrt{Y_4 Y_{10}} + K_{31} Y_3 Y_4}{2Y_3^2 + K_{i2} Y_4} [m] \quad (263)$$

Conductibilitatea termică, echivalentă, a izolațiilor din creștătură, λ_{i2S} , în $[W/m°C]$

$$\lambda_{i2S} = \frac{\beta_{i2S}}{\frac{\beta_{str}}{\lambda_{str}} + \frac{\beta_{em1} + \beta_{em2}}{\lambda_{em}} - \frac{\beta_0}{\lambda_0}} [W/\text{°Cm}] \quad (264)$$

unde:

$$\lambda_{str} \approx \lambda_{em} = 0,200 \text{ W/°Cm}$$

$$\lambda_0 = 0,025 \text{ W/°Cm} \text{ (pentru aer în straturi subțiri)}$$

$$\lambda_{i2S} = \frac{\beta_{str} + \beta_{em1} + \beta_{em2} + \beta_0}{5\beta_{str} + 5(\beta_{em1} + \beta_{em2}) + 40\beta_0} = \frac{1}{5} \frac{\beta_{i2S}}{\underbrace{\beta_{str} + \beta_{em1} + \beta_{em2} + \beta_0}_{\beta_{i2S}} + 7\beta_0}$$

$$\frac{1}{\lambda_{izs}} = 5 \frac{\beta_{izs} + 7\beta_0}{\beta_{izs}} = 5 \left(1 + 7 \frac{\beta_0}{\beta_{izs}} \right)$$

in variabile curente:

$$\frac{1}{\lambda_{izs}} = 5 \left(1 - \frac{7 \cdot 0,2146 f_{1U} y_4 y_3}{\beta_{str} (2y_3^2 + k_{iz} y_4) + k_{28} y_3 \sqrt{y_4 y_{10}} + (1 - 0,7854 f_{1U}) y_3 y_4} \right) = \\ = 5 \frac{\beta_{str} (2y_3^2 + k_{iz} y_4) + k_{28} \sqrt{y_4 y_{10}} + (1 - 2,2876 f_{1U}) y_3 y_4}{\beta_{str} (2y_3^2 + k_{iz} y_4) + k_{28} y_3 \sqrt{y_4 y_{10}} + (1 - 0,7854 f_{1U}) y_3 y_4}$$

CU:

$$K_{32} = (1 - 2,2876 f_{1U})$$

scriem:

$$\frac{1}{\lambda_{izs}} = 5 \frac{k_{29} y_3^2 + k_{30} y_4 + k_{28} y_3 \sqrt{y_4 y_{10}} + k_{31} y_3 y_4}{k_{29} y_3^2 + k_{30} y_4 + k_{28} \sqrt{y_4 y_{10}} + k_{32} y_3 y_4} \quad [\text{°Cm/w}] \quad (265)$$

Suprafata crestaturii (S_{tcr})

$$S_{tcrs} = Z_1 P_{crs} \cdot L_p \quad [m^2] \quad (266)$$

in variabile curente:

$$S_{tcrs} = Z_1 (2y_3 + k_{iz} \frac{y_4}{y_3}) y_2 \quad [m^2] \quad (267)$$

Rezistență termică echivalentă la treierea fluxului termic de la infășurare la fierul statoric (R_{izs})

$$R_{izs} = \frac{\beta_{izs}}{\lambda_{izs} S_{tcrs}} \quad [\text{°C/w}] \quad (268)$$

Cădere de temperatură dintre cupru și fier

$$\theta_{Cu-Fe} = P_{Cu_1} \cdot R_{izs} \quad [\text{°C}] \quad (269)$$

Coefficientul de transmisie a căldurii de la carcasa la aerul de răcire

$$\alpha_v = \alpha_0 (1 + k \sqrt{V_0}) \quad (270)$$

unde:

α_0 = coeficientul de transmisie a căldurii în aer liniștit

Pentru suprafețe din fontă sau oțel chituite și acoperite prin vopsire

$$\alpha_0 = 14,2$$

[W/°Cm²]

K = coeficient prin care se ține seama de eficacitatea suflării cu aer a suprafeței

Pentru suprafața exterioară a carcasei cu nervuri în cozul ventilației exterioare

$$K \approx 1$$

[m/s]^{-1/2}

v_a = viteza medie a aerului de răcire în zona mediană a carcasei

Pentru 2p=4 avem în medie

$$\text{gab 5} \quad v_a \approx 5 \text{ m/s}$$

[m/s]

$$\text{la: gab 6} \quad v_a \approx 6 \text{ m/s}$$

[m/s]

$$\text{gab 7} \quad v_a \approx 7 \text{ m/s}$$

[m/s]

Suprafața exterioară a mașinii spălată de aerul de răcire (ventilață)

$$S_v = k_v \tilde{\pi} [D_{si} + 2(h_s + h_{ij})] \cdot L_p \quad [\text{m}^2] \quad (271)$$

în variabile curente

$$S_v = k_v \tilde{\pi} [y_1 + 2(y_3 + y_5)] \cdot y_2 \quad [\text{m}^2] \quad (272)$$

unde k_v = coeficientul care reprezintă raportul dintre suprafața desfășurată a carcasei cu nervuri și suprafața laterată a miezului magnetic

în cozul nostru $k_v = 5,36$

Suprafața scuturilor port paier

$$S_o = 2 \frac{\tilde{\pi}}{4} [D_{si} + 2(h_s + h_{ij})]^2 \quad [\text{m}^2] \quad (273)$$

în variabile curente

$$S_0 = \frac{\pi}{2} [y_1 + 2(y_3 + y_5)]^2 \quad [m^2] \quad (274)$$

Rezistență termică la trecerea călduri de la carcasă-scufuri la aerul de răcire

$$R_C = \frac{1}{\alpha_s S_0 + \alpha_v S_v} \quad [^\circ C/W] \quad (275)$$

Căderea de temperatură dintre carcasă și aerul de răcire

$$\theta_{ca} = R_C \cdot P_{tot} \quad [^\circ C] \quad (276)$$

încălzirea medie a aerului de răcire în zonă mediană a carcasei (β_a)

Pentru ventilatie exterioară și încălziri ale mașinii corespunzătoare claselor de izolație E și B avem

$$\beta_a \approx 10 \quad [^\circ C] \quad (277)$$

încălzirea cuprului înfășurării față de mediu ambient.

$$\beta_{cu} = \beta_{cu-fe} + \beta_{ca} + \frac{1}{2} \beta_a \quad [^\circ C] \quad (278)$$

%

ANEXA NR. 11

TABELA NR. 4 - 1 pagină

CONTINȚIND VALORILE: $p_{sj} = f(B_{sj})$

$p_{sz} = f(B_{sz})$

Anexul 8.

TABEL 4

Pentru determinarea $F_{ij} = f(B_{Sj})$ și $P_{Sz} = f(B_{Sz})$

B Gauss	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
5000	1	1,04	1,08	1,11	1,14	1,16	1,19	1,21	1,22	1,25
6000	1,4	1,15	1,15	1,15	1,15	1,16	1,16	1,17	1,17	1,18
7000	1,9	1,05	2	2,05	2,1	2,15	2,15	2,15	2,15	1,75
8000	2,3	2,35	2,45	2,5	2,5	2,55	2,6	2,65	2,7	2,75
9000	2,8	2,85	3,05	3,1	3,15	3,18	3,18	3,18	3,18	3,18
10.000	3,3	3,35	3,45	3,55	3,62	3,7	3,78	3,78	3,78	3,78
12.000	5,9	6	6,1	6,2	6,3	6,4	6,5	6,6	6,7	6,8
14.000	6,6	7	7,1	7,2	7,3	7,4	7,5	7,6	7,7	7,8
15.000	7,9	8	8,1	8,2	8,3	8,4	8,5	8,6	8,7	8,8
16.000	9	9,1	9,2	9,3	9,4	9,5	9,6	9,7	9,8	9,9
17.000	9,9	10,1	10,2	10,3	10,4	10,52	10,6	10,76	10,88	11,3
18.000	11	11,3	11,6	11,75	11,9	12,15	12,3	12,5	12,8	13,2
19.000	12,5	12,8	13,1	13,25	13,4	13,4	13,4	13,4	13,7	14,1
19.500	12,95	13,1	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,7	14,1
20.000	13,1	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,7	14,1
20.500	13,5	13,8	14,1	14,4	14,7	15,1	15,4	15,7	16,1	16,5
21.000	14,1	14,4	14,7	15,1	15,4	15,7	16,1	16,4	16,8	17,2
21.500	14,7	15,1	15,4	15,7	16,1	16,4	16,8	17,1	17,5	18,1
22.000	15,4	15,7	16,1	16,4	16,8	17,1	17,4	17,8	18,2	18,7
22.500	16,1	16,4	16,8	17,1	17,4	17,8	18,1	18,5	18,9	19,4
23.000	16,8	17,1	17,4	17,8	18,1	18,5	18,8	19,1	19,5	19,9
23.500	17,4	17,8	18,1	18,5	18,8	19,1	19,4	19,7	20,1	20,5
24.000	18,1	18,5	18,8	19,1	19,4	19,7	20,1	20,4	20,8	21,2
24.500	18,8	19,1	19,4	19,7	20,1	20,4	20,8	21,1	21,5	21,9
25.000	19,4	19,7	20,1	20,4	20,8	21,1	21,4	21,8	22,2	22,6
25.500	20,1	20,4	20,8	21,1	21,5	21,8	22,1	22,5	22,9	23,3
26.000	20,8	21,1	21,5	21,8	22,1	22,5	22,8	23,2	23,6	24,0
26.500	21,4	21,7	22,1	22,5	22,8	23,1	23,4	23,8	24,2	24,6
27.000	22,1	22,4	22,8	23,1	23,5	23,8	24,1	24,5	24,9	25,3
27.500	22,8	23,1	23,5	23,8	24,1	24,5	24,8	25,2	25,6	26,0
28.000	23,4	23,7	24,1	24,5	24,8	25,1	25,4	25,8	26,2	26,6
28.500	24,1	24,4	24,8	25,1	25,5	25,8	26,1	26,5	26,9	27,3
29.000	24,7	25,1	25,5	25,8	26,1	26,5	26,8	27,2	27,6	28,0
29.500	25,4	25,7	26,1	26,5	26,8	27,1	27,4	27,8	28,2	28,6
30.000	26,1	26,4	26,8	27,1	27,5	27,8	28,1	28,5	28,9	29,3
30.500	26,8	27,1	27,5	27,8	28,1	28,5	28,8	29,2	29,6	30,0
31.000	27,4	27,7	28,1	28,5	28,8	29,1	29,4	29,8	30,2	30,6
31.500	28,1	28,4	28,8	29,1	29,5	29,8	30,1	30,5	30,9	31,3
32.000	28,7	29,1	29,5	29,8	30,1	30,5	30,8	31,2	31,6	32,0
32.500	29,4	29,7	30,1	30,5	30,8	31,1	31,4	31,8	32,2	32,6
33.000	30,1	30,4	30,8	31,1	31,5	31,8	32,1	32,5	32,9	33,3
33.500	30,7	31,1	31,5	31,8	32,1	32,5	32,8	33,2	33,6	34,0
34.000	31,4	31,7	32,1	32,5	32,8	33,1	33,4	33,8	34,2	34,6
34.500	32,1	32,4	32,8	33,1	33,5	33,8	34,1	34,5	34,9	35,3
35.000	32,7	33,1	33,5	33,8	34,1	34,5	34,8	35,2	35,6	36,0
35.500	33,4	33,7	34,1	34,5	34,8	35,1	35,4	35,8	36,2	36,6
36.000	34,1	34,4	34,8	35,1	35,5	35,8	36,1	36,5	36,9	37,3
36.500	34,7	35,1	35,5	35,8	36,1	36,5	36,8	37,2	37,6	38,0
37.000	35,4	35,7	36,1	36,5	36,8	37,1	37,4	37,8	38,2	38,6
37.500	36,1	36,4	36,8	37,1	37,5	37,8	38,1	38,5	38,9	39,3
38.000	36,7	37,1	37,5	37,8	38,1	38,5	38,8	39,2	39,6	40,0
38.500	37,4	37,7	38,1	38,5	38,8	39,1	39,4	39,8	40,2	40,6
39.000	38,1	38,4	38,8	39,1	39,5	39,8	40,1	40,5	40,9	41,3
39.500	38,7	39,1	39,5	39,8	40,1	40,5	40,8	41,2	41,6	42,0
40.000	39,4	39,7	40,1	40,5	40,8	41,1	41,4	41,8	42,2	42,6
40.500	39,7	40,1	40,5	40,8	41,1	41,5	41,8	42,2	42,6	43,0
41.000	40,4	40,7	41,1	41,5	41,8	42,1	42,4	42,8	43,2	43,6
41.500	41,1	41,4	41,8	42,1	42,5	42,8	43,1	43,5	43,9	44,3
42.000	41,7	42,1	42,5	42,8	43,1	43,5	43,8	44,2	44,6	45,0
42.500	42,4	42,7	43,1	43,5	43,8	44,1	44,4	44,8	45,2	45,6
43.000	43,1	43,4	43,8	44,1	44,5	44,8	45,1	45,5	45,9	46,3
43.500	43,7	44,1	44,5	44,8	45,1	45,5	45,8	46,2	46,6	47,0
44.000	44,4	44,7	45,1	45,5	45,8	46,1	46,4	46,8	47,2	47,6
44.500	45,1	45,4	45,8	46,1	46,5	46,8	47,1	47,5	47,9	48,3
45.000	45,7	46,1	46,5	46,8	47,1	47,5	47,8	48,2	48,6	49,0
45.500	46,4	46,7	47,1	47,5	47,8	48,1	48,4	48,8	49,2	49,6
46.000	47,1	47,4	47,8	48,1	48,5	48,8	49,1	49,5	49,9	50,3
46.500	47,7	48,1	48,5	48,8	49,1	49,5	49,8	50,2	50,6	51,0
47.000	48,4	48,7	49,1	49,5	49,8	50,1	50,4	50,8	51,2	51,6
47.500	49,1	49,4	49,8	50,1	50,5	50,8	51,1	51,5	51,9	52,3
48.000	49,7	50,1	50,5	50,8	51,1	51,5	51,8	52,2	52,6	53,0
48.500	50,4	50,7	51,1	51,5	51,8	52,1	52,4	52,8	53,2	53,6
49.000	51,1	51,4	51,8	52,1	52,5	52,8	53,1	53,5	53,9	54,3
49.500	51,7	52,1	52,5	52,8	53,1	53,5	53,8	54,2	54,6	55,0
50.000	52,4	52,7	53,1	53,5	53,8	54,1	54,4	54,8	55,2	55,6
50.500	53,1	53,4	53,8	54,1	54,5	54,8	55,1	55,5	55,9	56,3
51.000	53,7	54,1	54,5	54,8	55,1	55,5	55,8	56,2	56,6	57,0
51.500	54,4	54,7	55,1	55,5	55,8	56,1	56,4	56,8	57,2	57,6
52.000	55,1	55,4	55,8	56,1	56,5	56,8	57,1	57,5	57,9	58,3
52.500	55,7	56,1	56,5	56,8	57,1	57,5	57,8	58,2	58,6	59,0
53.000	56,4	56,7	57,1	57,5	57,8	58,1	58,4	58,8	59,2	59,6
53.500	57,1	57,4	57,8	58,1	58,5	58,8	59,1	59,5	59,9	60,3
54.000	57,7	58,1	58,5	58,8	59,1	59,5	59,8	60,2	60,6	61,0
54.500	58,4	58,7	59,1	59,5	59,8	60,1	60,4	60,8	61,2	61,6
55.000	59,1	59,4	59,8	60,1	60,5	60,8	61,1	61,5	61,9	62,3
55.500	59,7	60,1	60,5	60,8	61,1	61,5	61,8	62,2	62,6	63,0
56.000	60,4	60,7	61,1	61,5	61,8	62,1	62,4	62,8	63,2	63,6
56.500	61,1	61,4	61,8	62,1	62,5	62,8	63,1	63,5	63,9	64,3
57.000	61,7	62,1	62,5	62,8	63,1	63,5	63,8	64,2	64,6	65,0
57.500	62,4	62,7</td								

ANEXA NR. 12

SCHEMA LOGICA A SUBPROGRAMULUI - MAGNET

5 pagini

MAGNET (PNOM, UDELT, PULI, FREC, Z1, Z2, DRI, DELTA,
 CARTER, ZKFE, F, W, REACT1, Y1, Y2, Y3, Y4, Y5, Y6, Y7, Y8, Y9, Y10,
 BEDEL, BEZE1, BEJ1, BEJE2, BEJ2, ADEL, AZE1, AJ1, AZE2,
 AJ2, AKAR, TAUJEX, CRMIU, *)

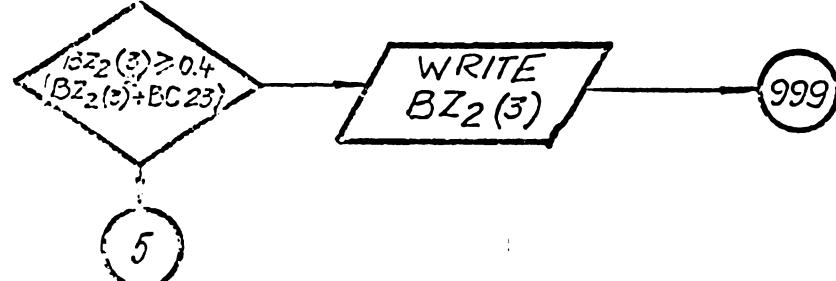
DIMENSION

BZ2 (3) HZ2 (3)

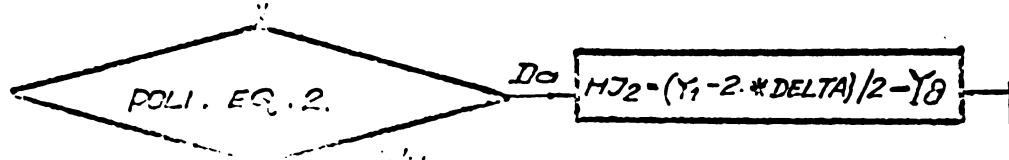
$$\begin{aligned} PI &= 3.14159 \\ SBRUT1 &= 1.2 * Y4 \\ TE1 &= PI * Y1 / Z1 \\ TH1 &= PI * (Y1 + Y3) / Z1 \\ BC1M &= SBRUT1 / Y3 \\ BZ1 &= TM1 - BC1M \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} TE2 &= PI * (Y1 - 2 * DELTA) / Z2 \\ DBP &= SQRT(4 * Y6 / PI) \\ ALFA1 &= Y8 - 0.5 - DBP \\ BC23 &= (Y7 - 0.6 * ALFA1) / (ALFA1 - 1.8 * (Y9 / Y2 / 3.95 * 1.E+7 - 1.57)) \\ HZ2(3) &= (Y7 - 0.6 * ALFA1) / (BC23 - 0.6) \\ HZ2(2) &= ALFA1 - HZ2(3) \\ HZ2(1) &= DBP + 0.5 \\ BZ2(1) &= PI * (Y1 - 2 * DELTA - HZ2(1)) / Z2 - 0.7 * DBP \\ BZ2(2) &= PI * (Y1 - 2 * (DELTA + HZ2(1)) - HZ2(2)) / Z2 - 0.6 \\ BZ2(3) &= PI * (Y1 - 2 * Y8 + HZ2(3)) / Z2 - BC23 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} HJ1 &= Y5 \\ ZLJ1 &= PI * (Y1 + 2 * Y3 - Y5) / PULI + Y5 \\ HJ2 &= (Y1 - 2 * DELTA - (2 * Y7 + 5 * DRI / 6)) / 2 \end{aligned}$$



$$ZLJ_2 = P_i \cdot (5. \cdot DRI/6 + HJ_2) / POLI + HJ_2$$

POLI.EQ.2.

Da

$$ZLJ_2 = 2. \cdot HJ_2$$

$$W_1 = Z_1 \cdot Y_{10} / (6 \cdot 4)$$

$$TAUP = P_i \cdot Y_1 / POLI$$

$$TAU1 = 1 / (0.995 - 0.002 \cdot POLI) - 1$$

$$NR = 1$$

10

$$AKAS = 1.6$$

$$NKAS = 1$$

20

ALEF (AKAS, ALFA, Efbe)

ALFA.EQ.10.

Da

22

WRITE.....KS nu
converge varionto
abandonato
4KAR

999

$$FLUX = UDELT \cdot 25. / (1 + TAU1) / (EFBE \cdot FREC \cdot W1 \cdot F1H)$$

$$\text{BEDEL} = \text{FLUX} \cdot 10000. / (\text{ALFA} \cdot \text{TAUP} \cdot Y_2)$$

$$\text{BEZE1} = TE1 \cdot \text{BEDEL} \cdot (3 + TAU1) / 3 \cdot ZKFE / BZ1$$

$$\text{BEIX} = \text{BEZE1}$$

$$INDB = 1$$

JAPAN (BEIX, AW)

AW.EQ.0.

Da

24

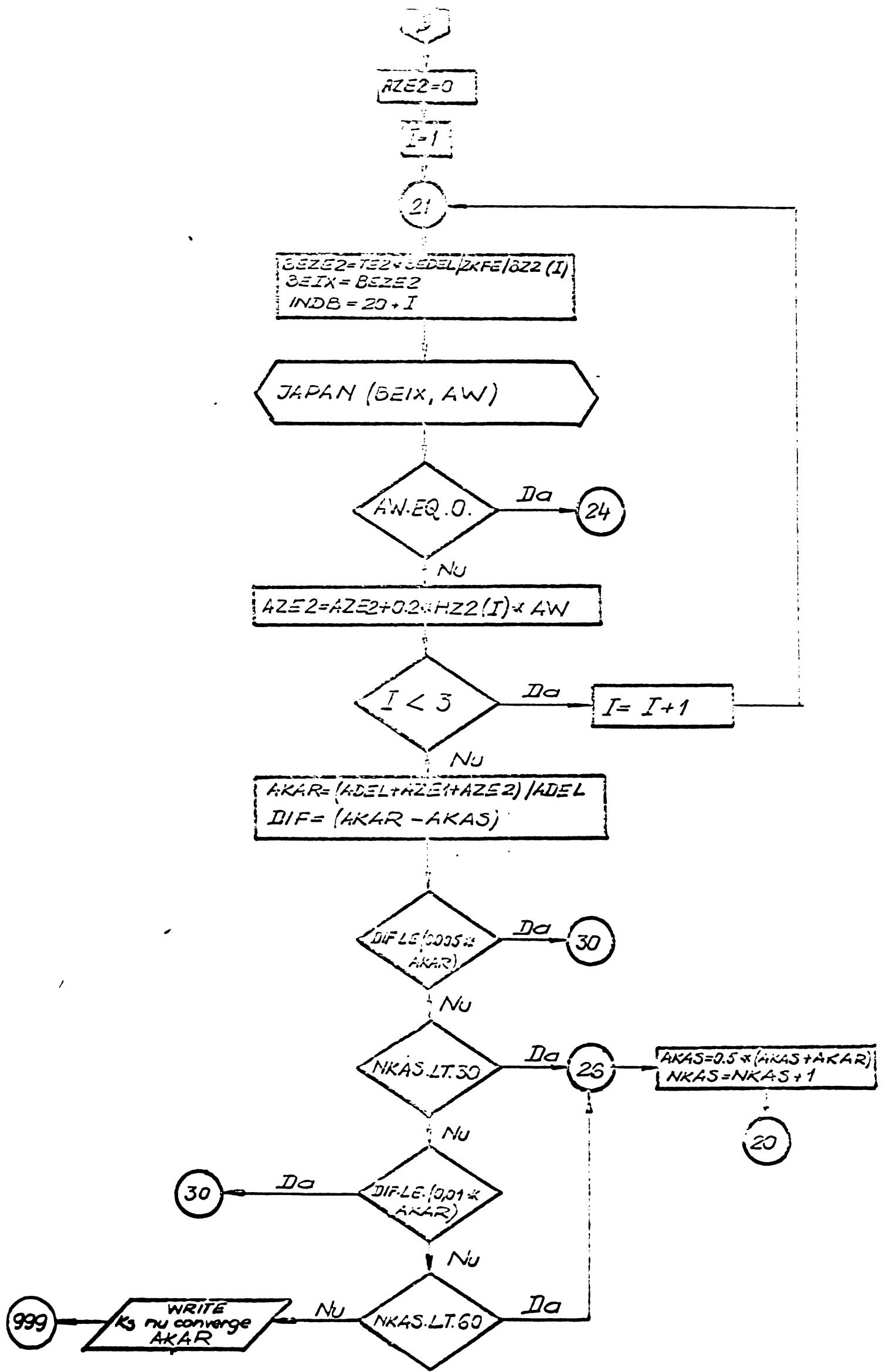
WRITE
INDB, BEIX

999

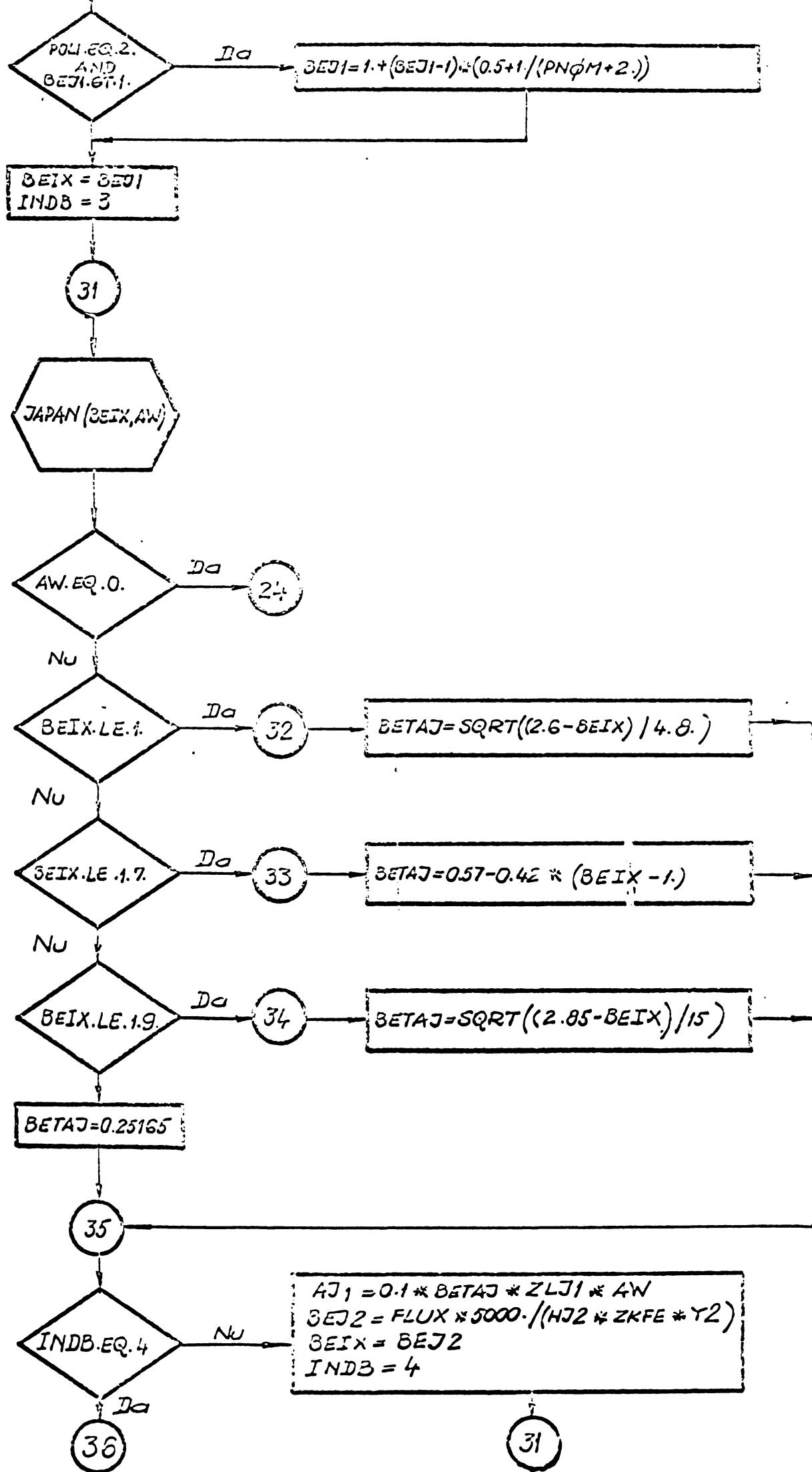
$$AZE1 = 0.2 \cdot Y_3 \cdot AW$$

$$ADEL = 1600. \cdot CARTER \cdot DELTA \cdot BEDEL$$

B



$$\text{BEJ}_1 = \text{FLUX} * 5000 * (1 + \text{TAU}_1) / (\text{HJ}_1 * \text{ZKFE} * \gamma_2)$$



36

```

AJ2 = 0.1 * BETAJ * ZLJ2 * AW
ATOT = AZE1 + AZE2 + ADEL + AJ1 + AJ2
CRMU = POLI * ATOT / 5.4 / W1 / F1W
TAU1EX = CRMU * REACT1 / (UDELT - CRMU * REACT1)
DIF1 = ABS (TAU1 - TAU1EX)

```

40 RETURN

NR. LT. 20 39 TAU1 = 0.5 * (TAU1 + TAU1EX)
 NR = NR + 1 10

WRITE
 TAU1 Nu converge,
 var. abandonato TAU1

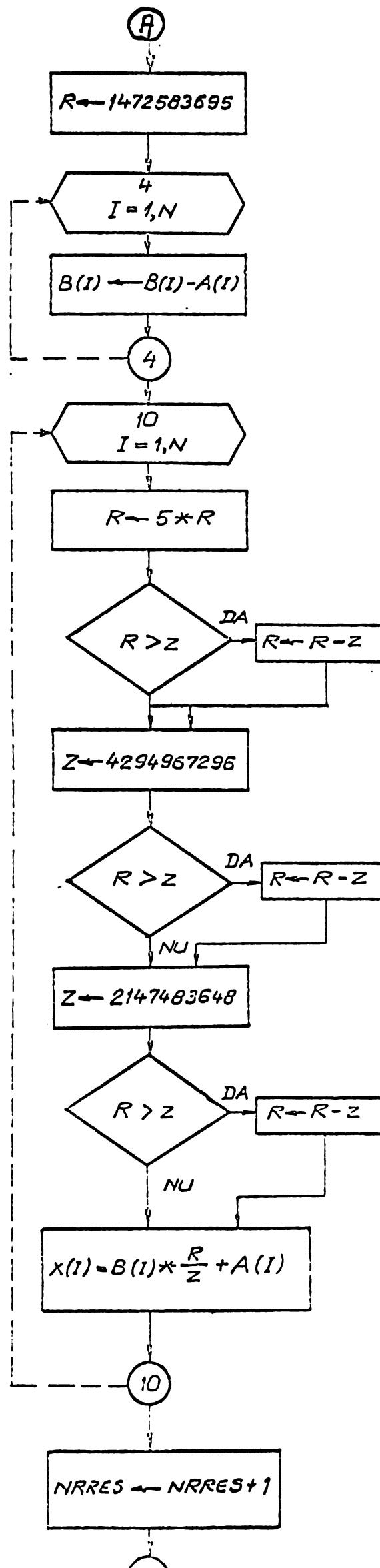
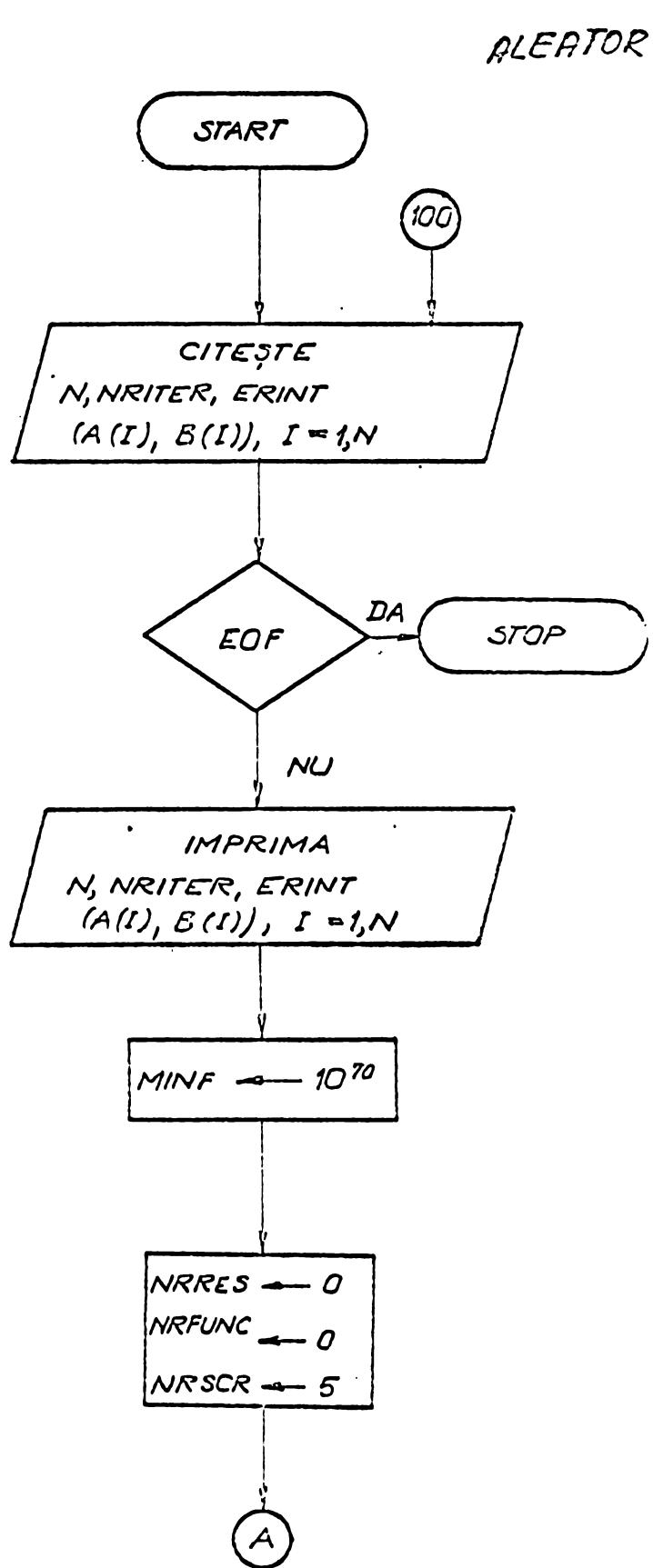
999

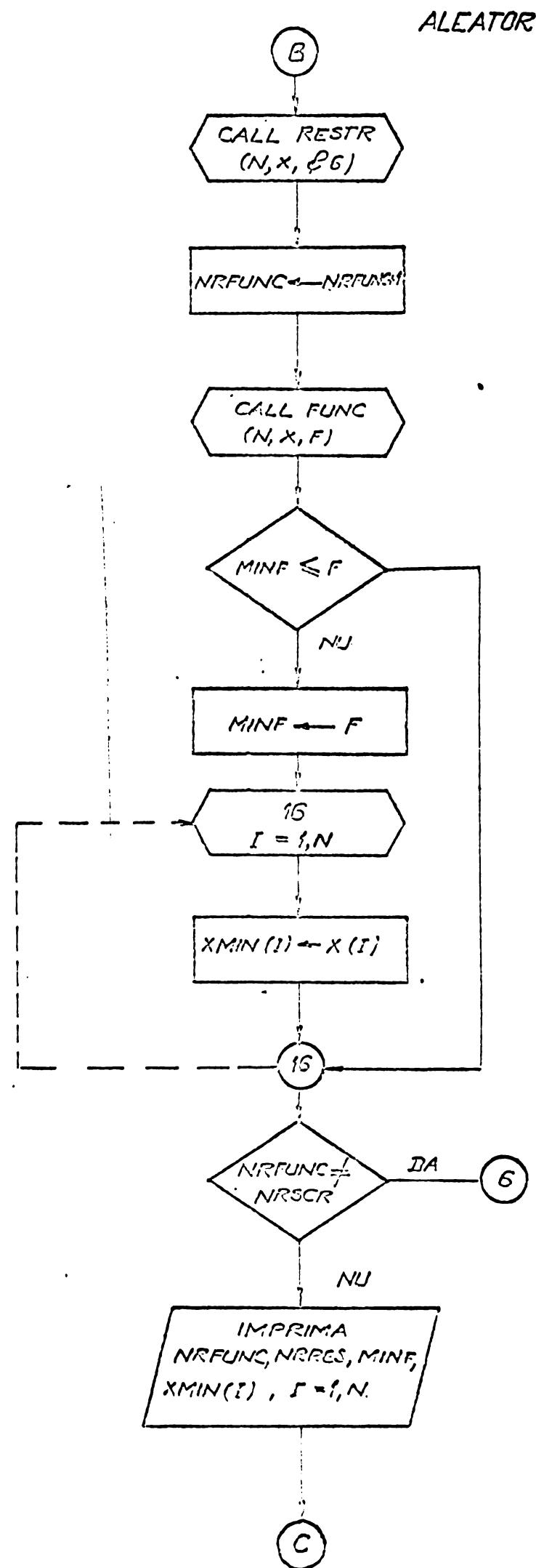
RETURN 1

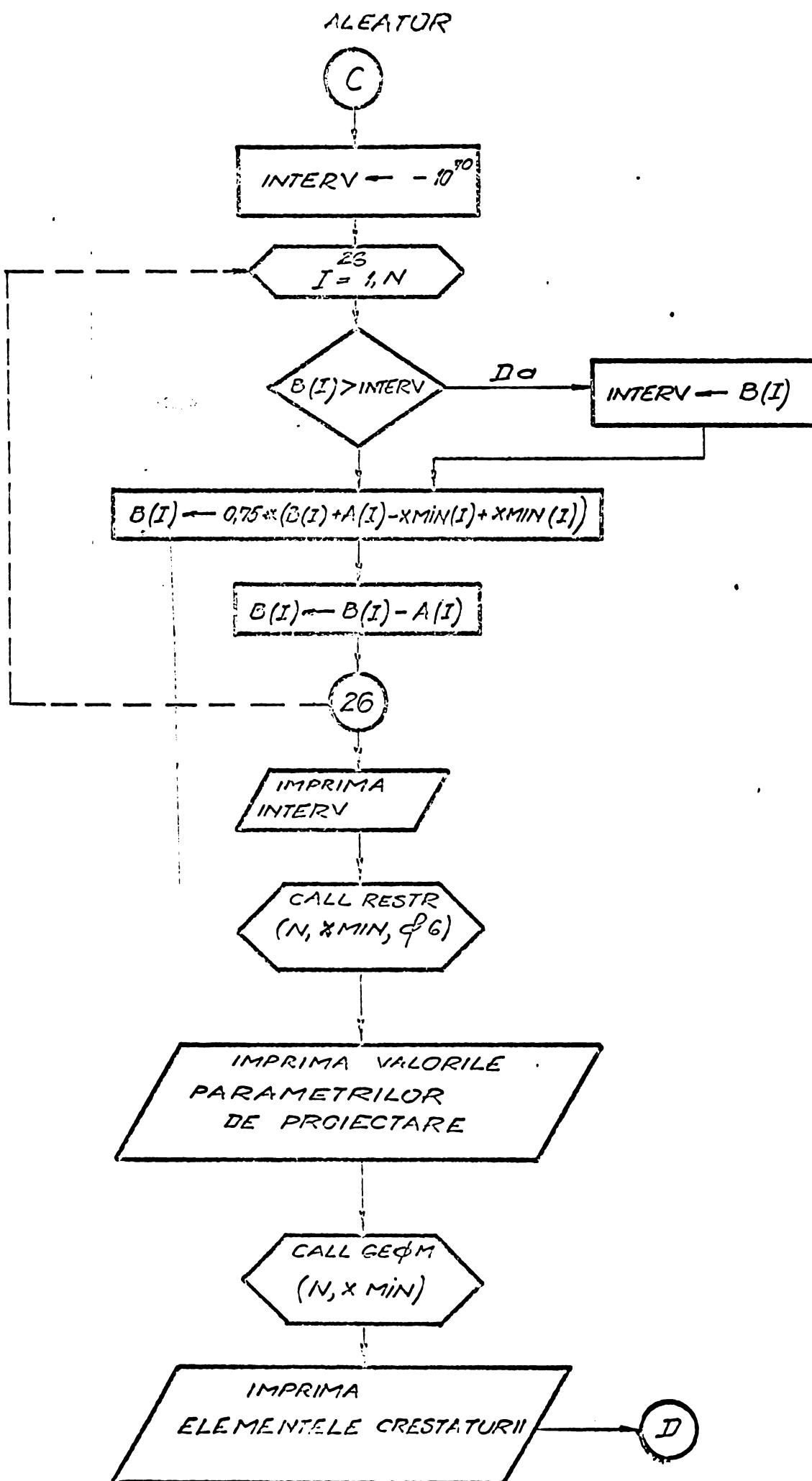
ANEXA NR. 13

SCHEMA LOGICA A PROGRAMULUI - ALEATOR

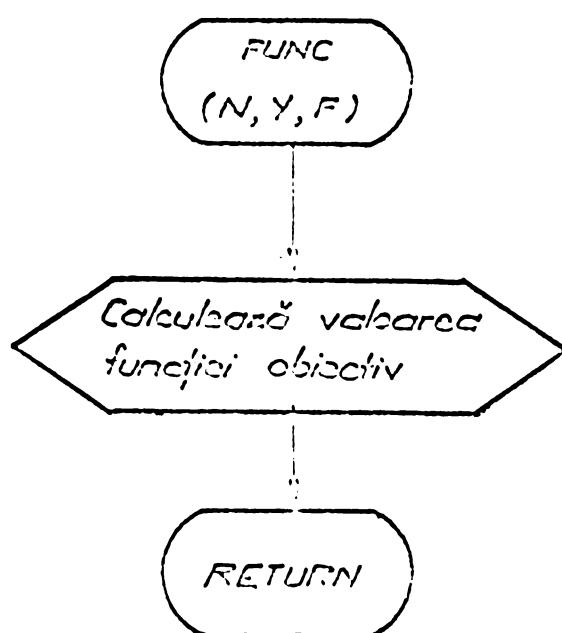
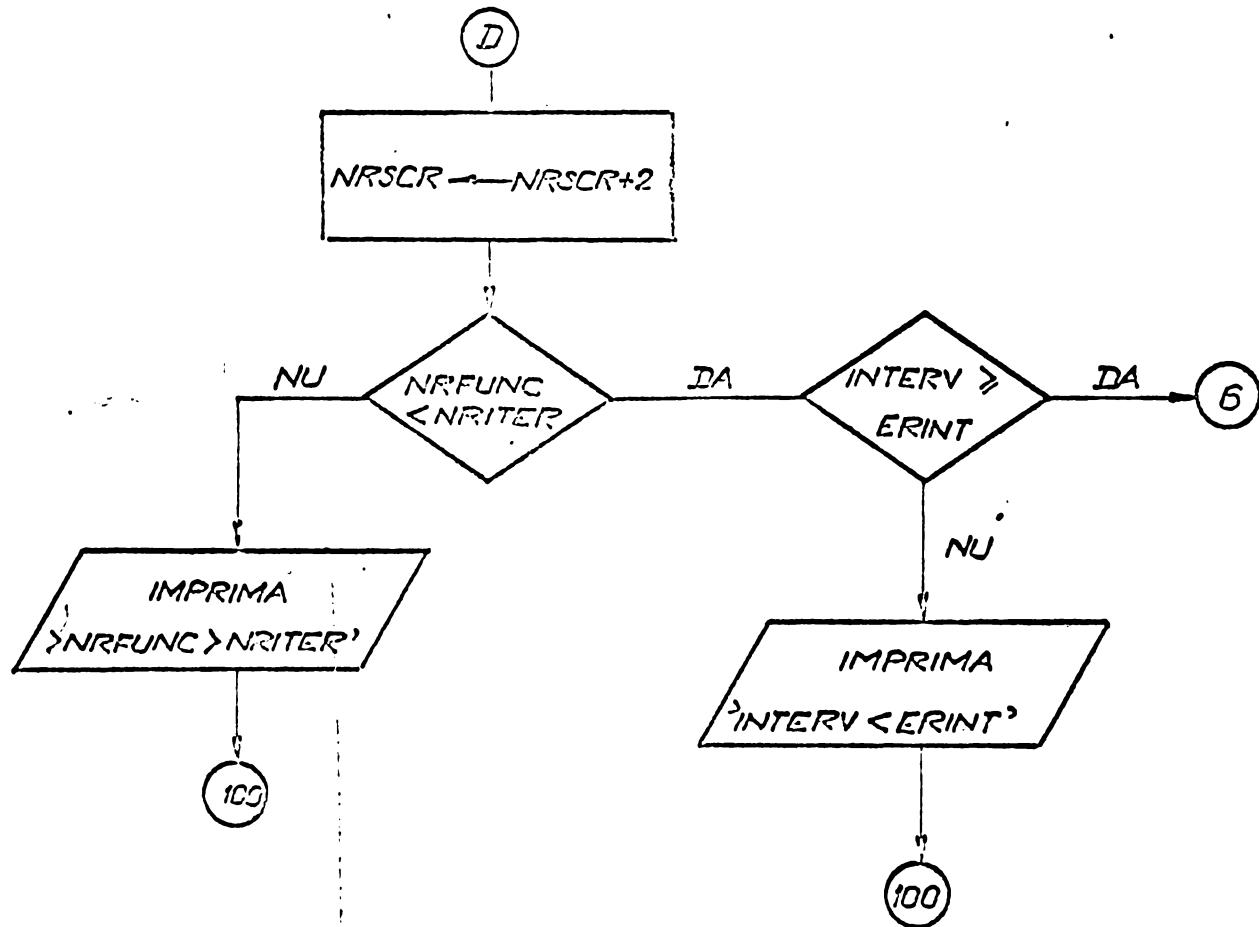
7 pagini

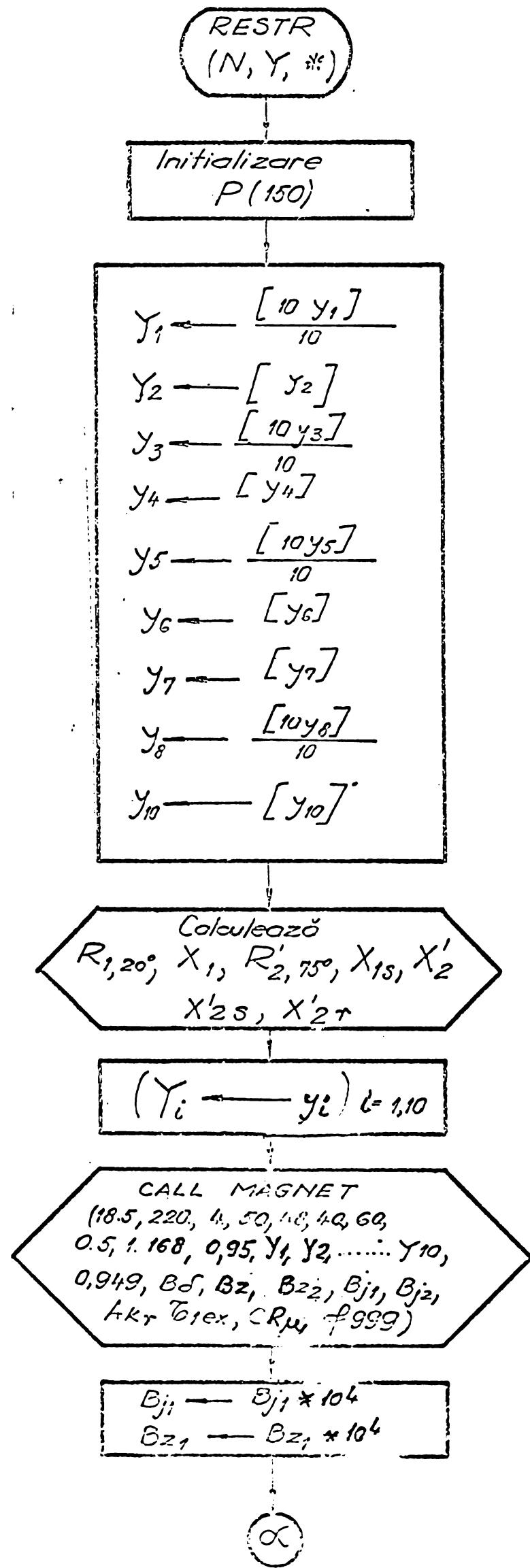


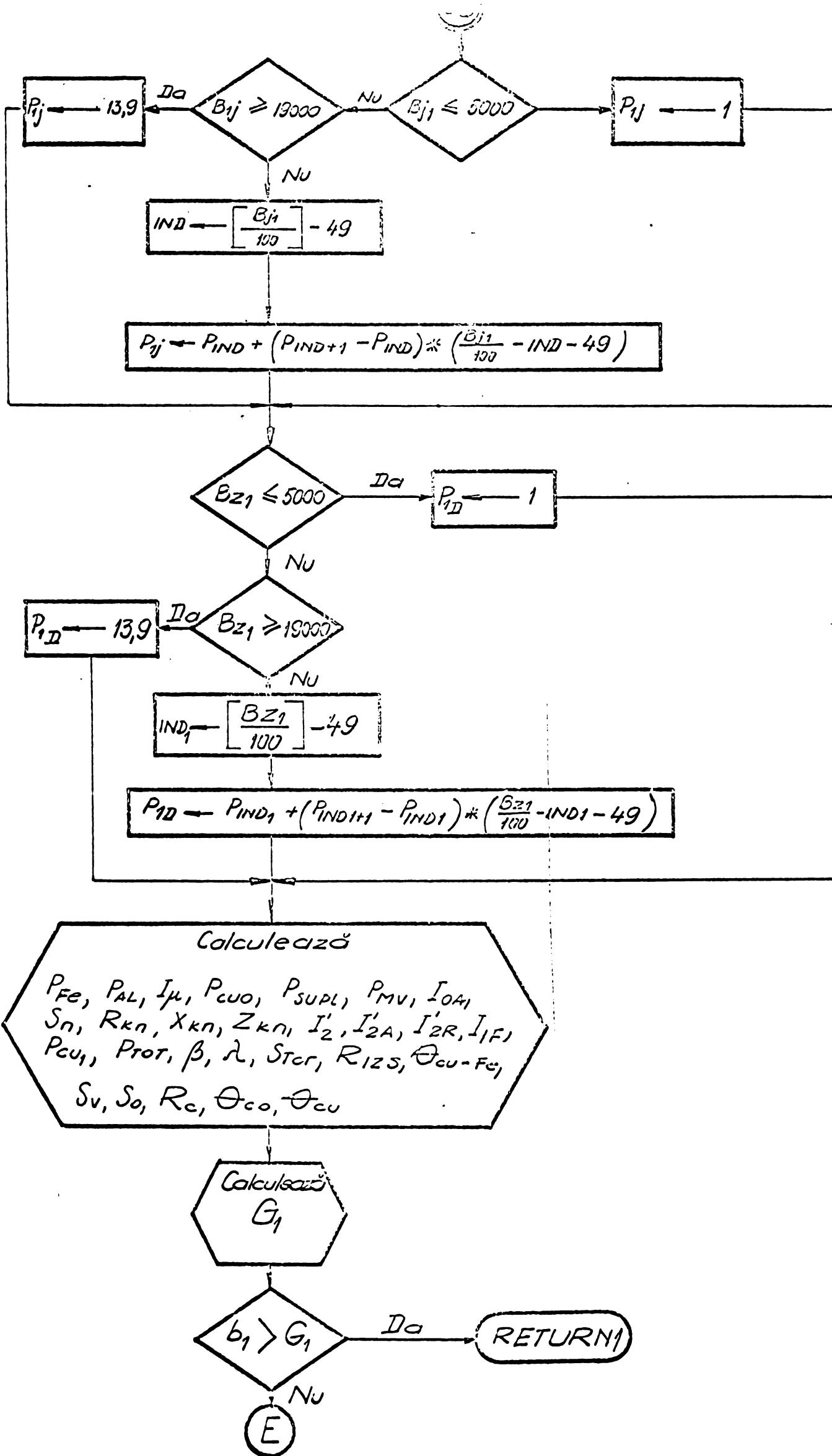




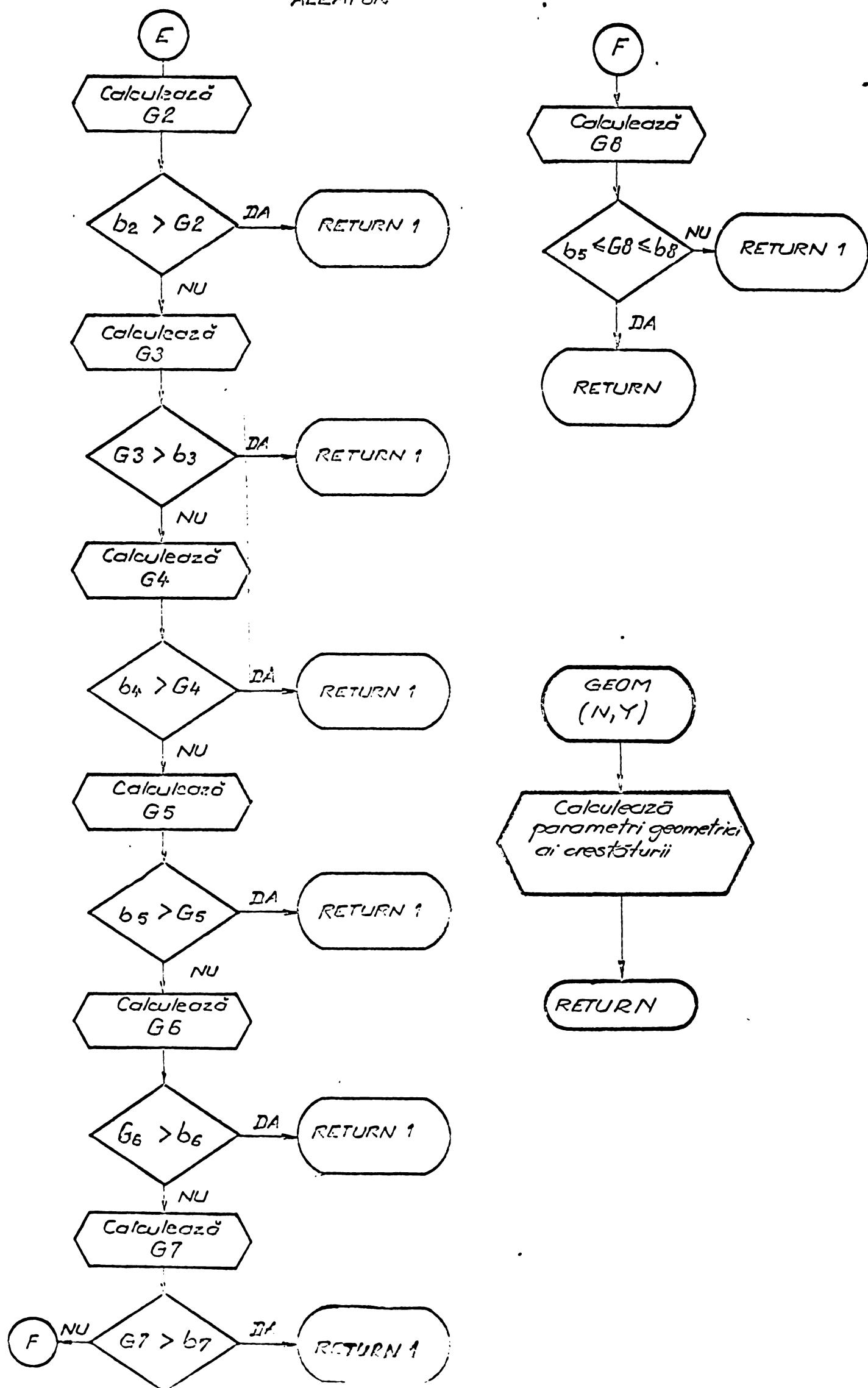
ALEATOR







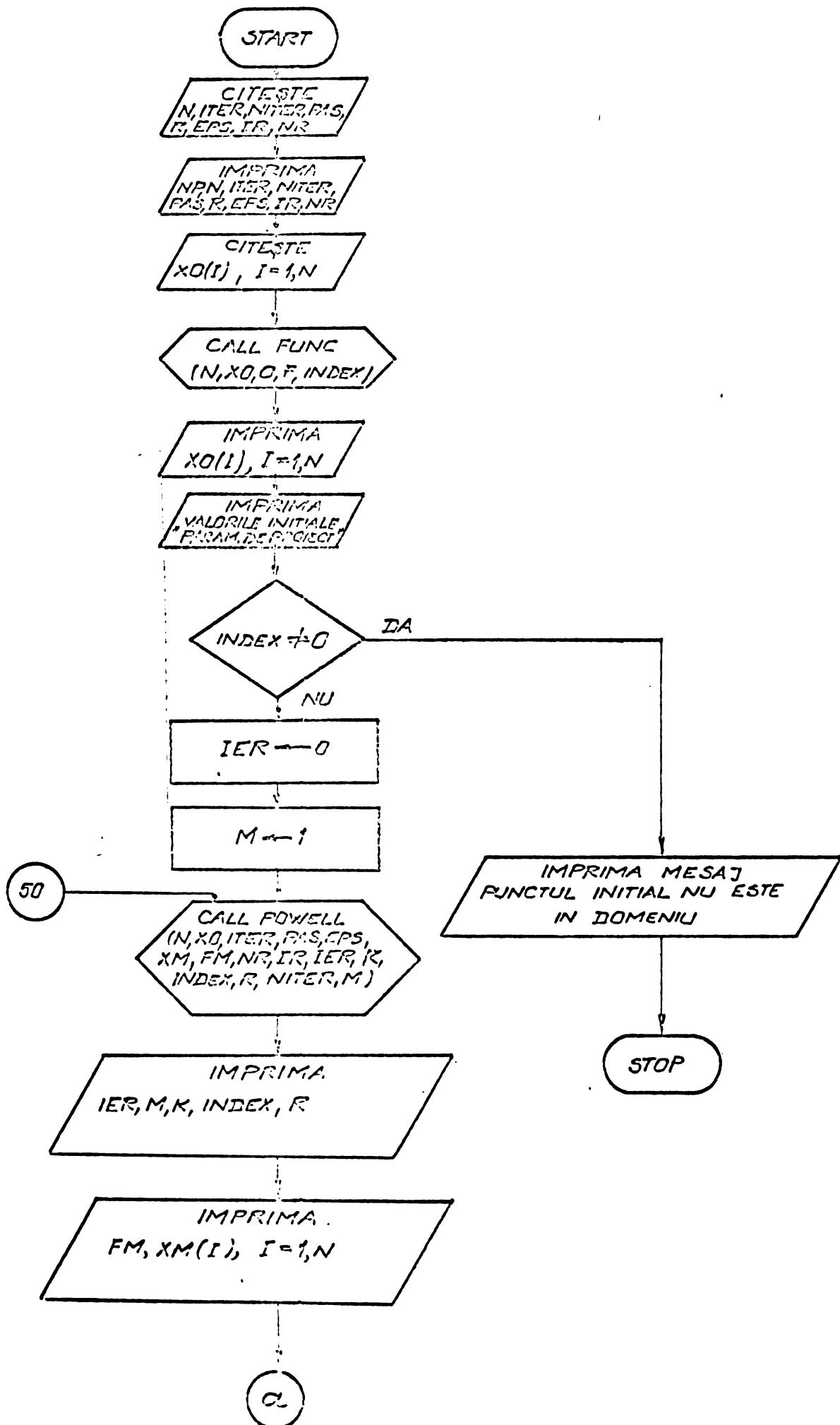
ALEATOR

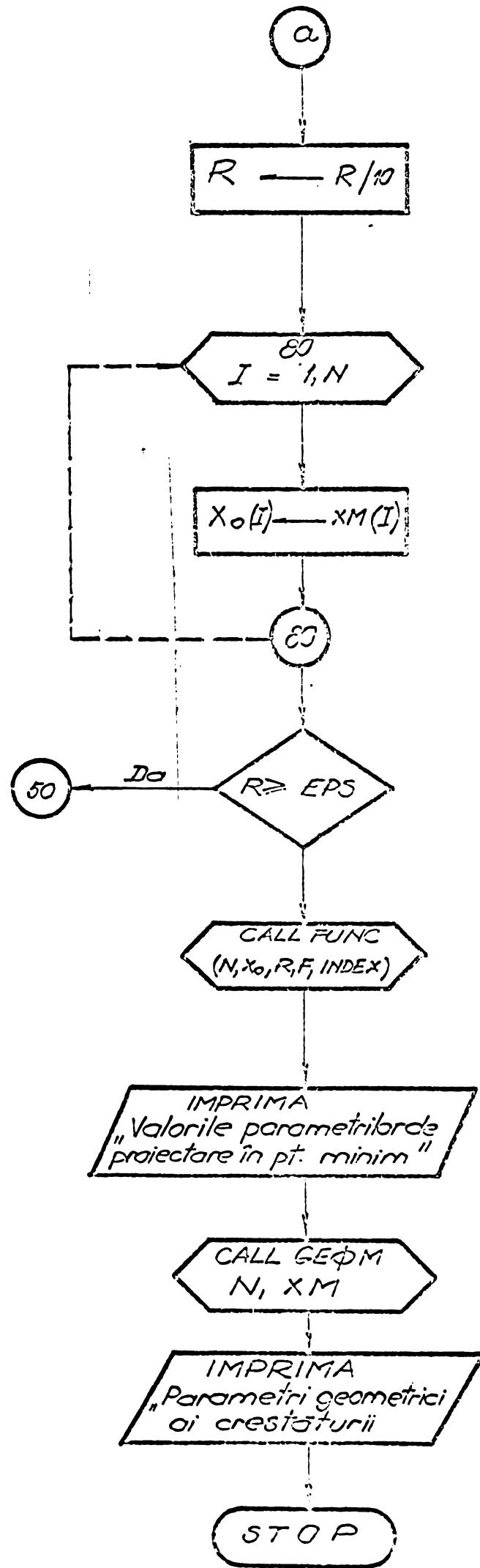


ANEXA NR. 14

SCHEMA LOGICA A METODEI - SUMT

2 pagini



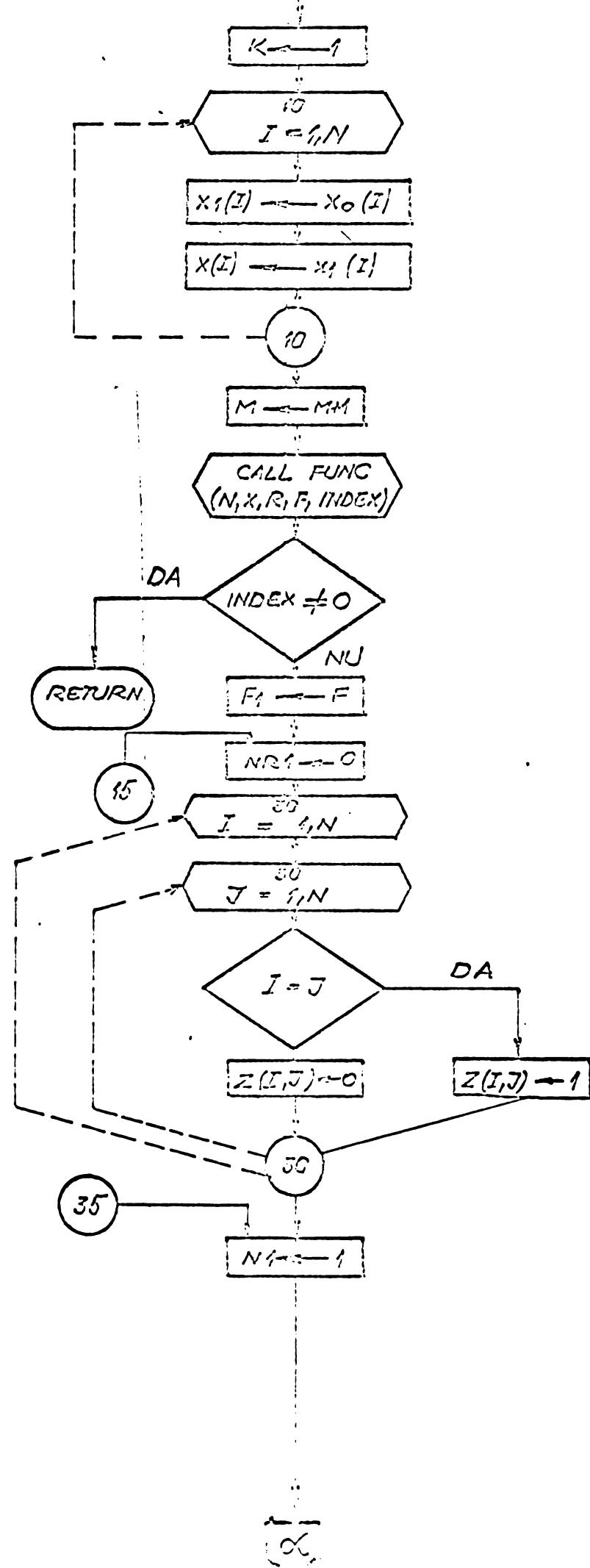


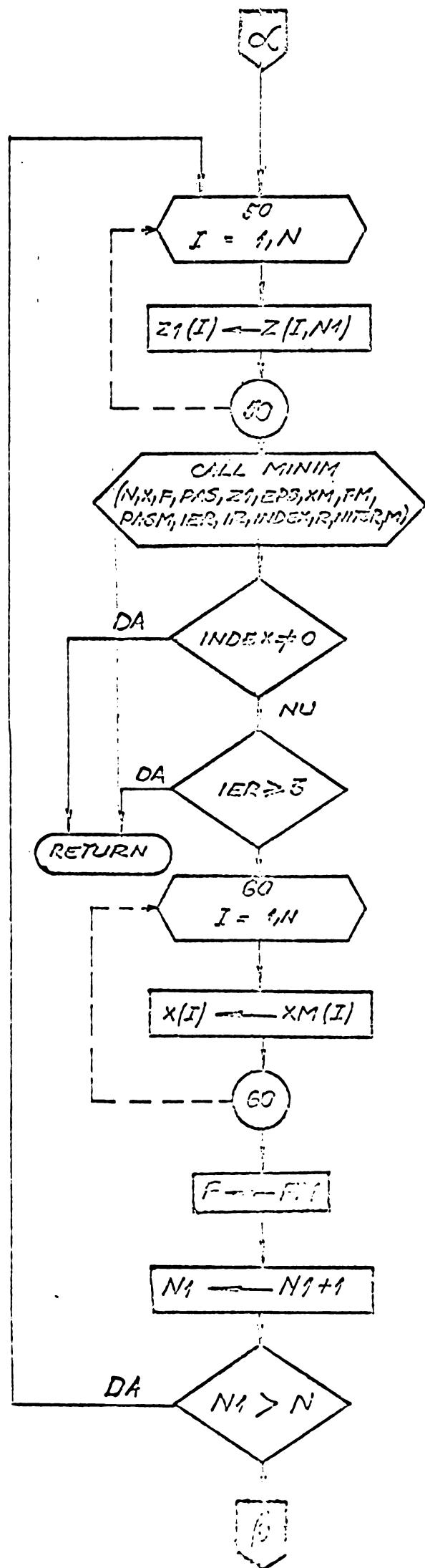
ANEXA NR. 15

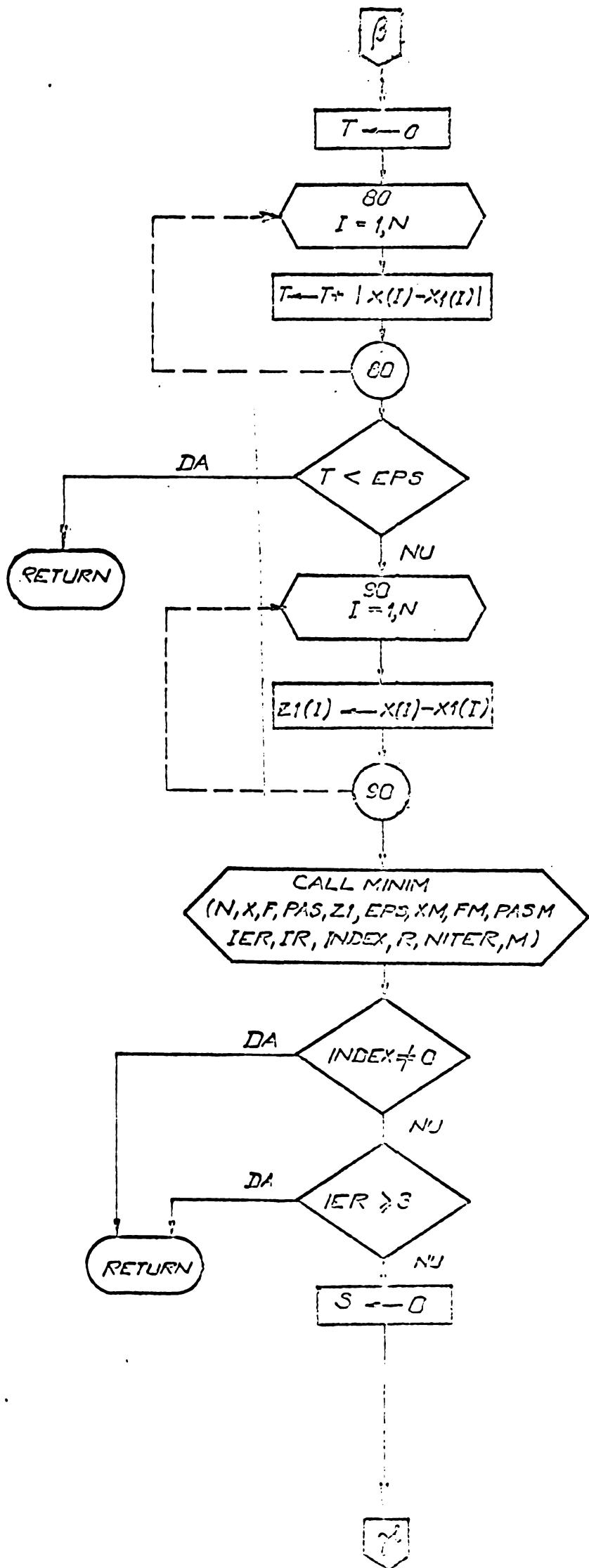
SCHEMA LOGICA A SUBPROGRAMULUI - POWELL

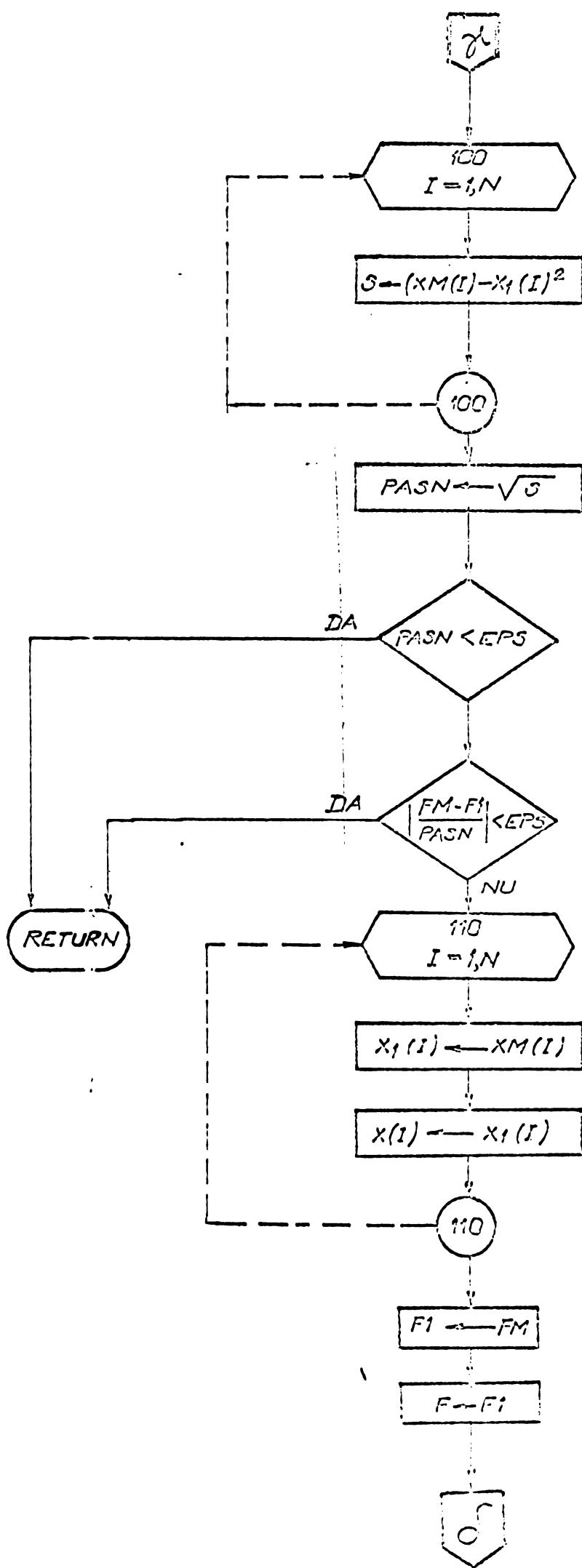
5 pagini

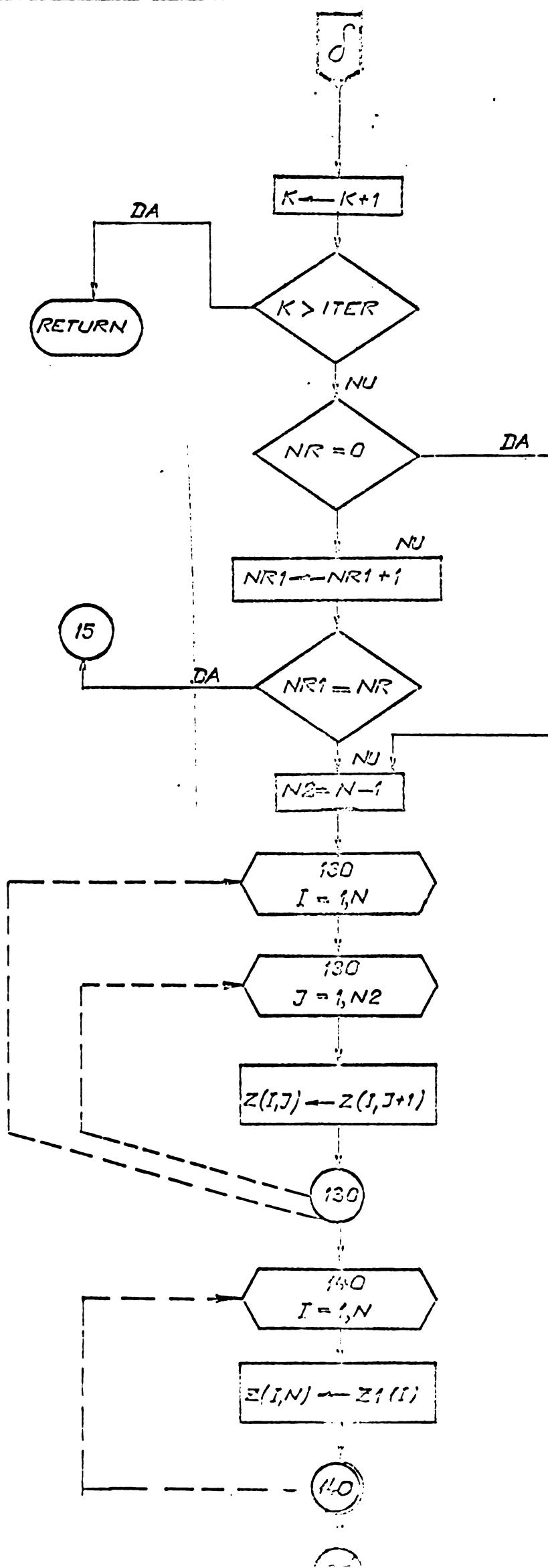
POWELL
 $(N, X_0, IER, PAS, EPS, X_1, R, M, NR, IR, IER, K, INDEX, R, NITER, M)$









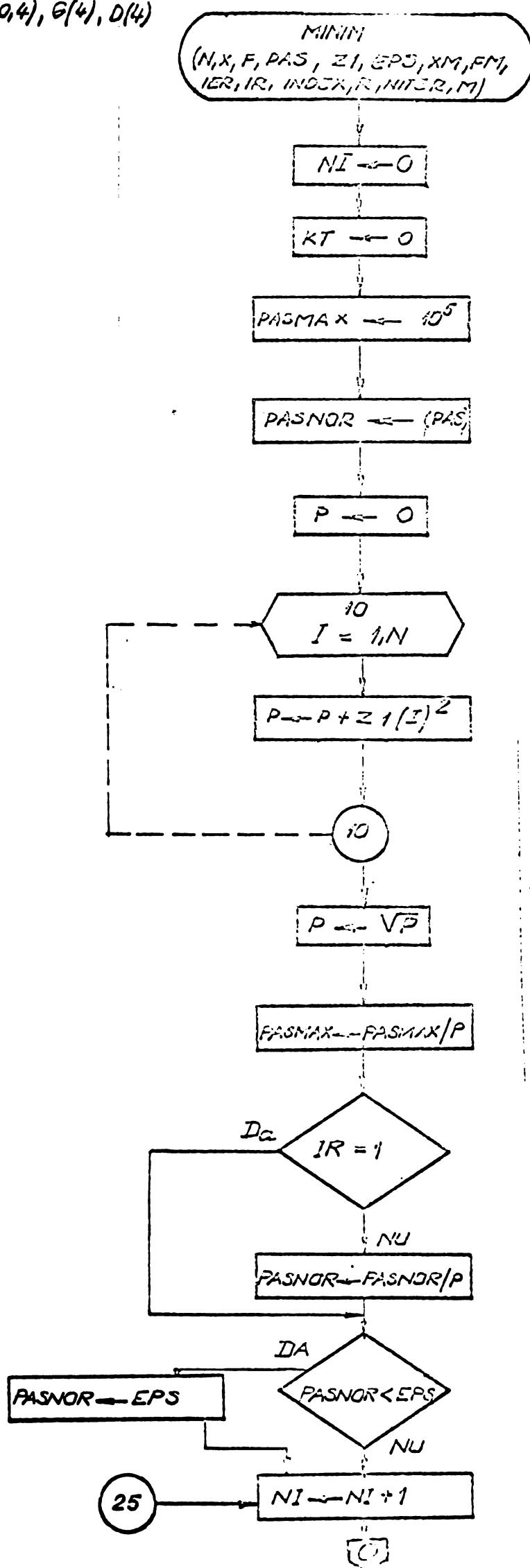


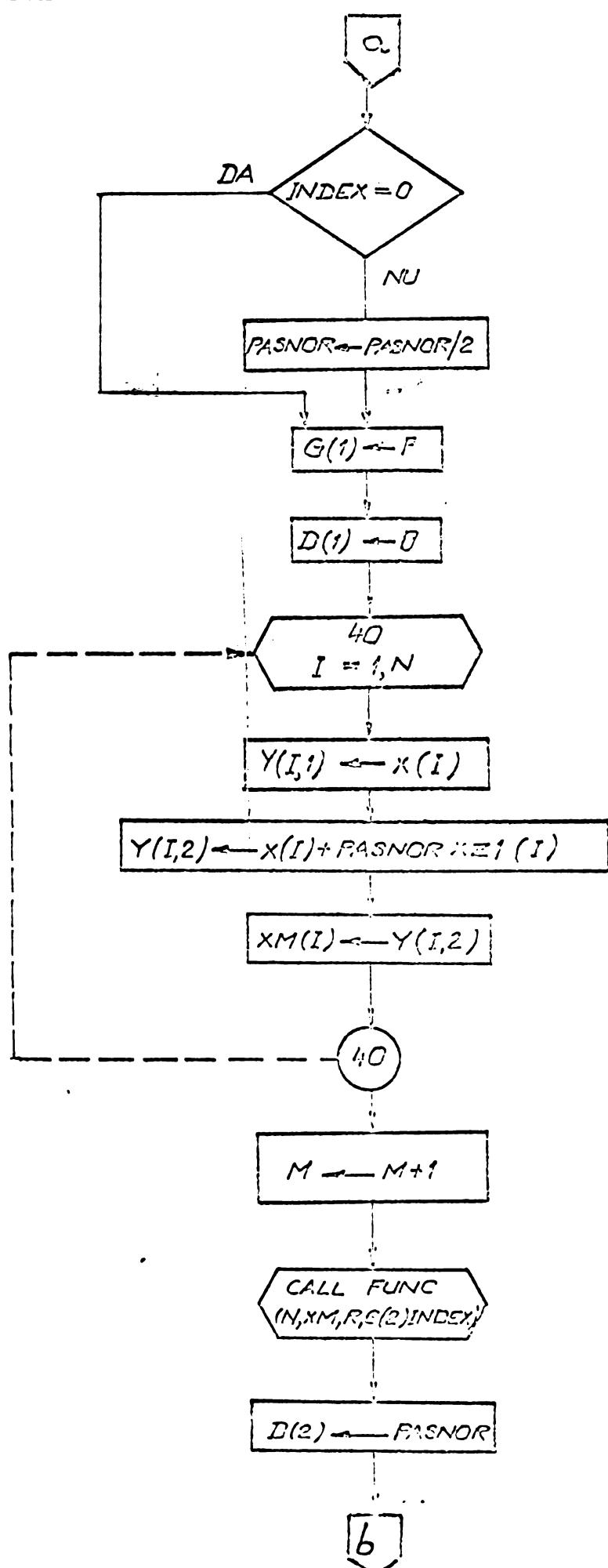
ANEXA NR. 16

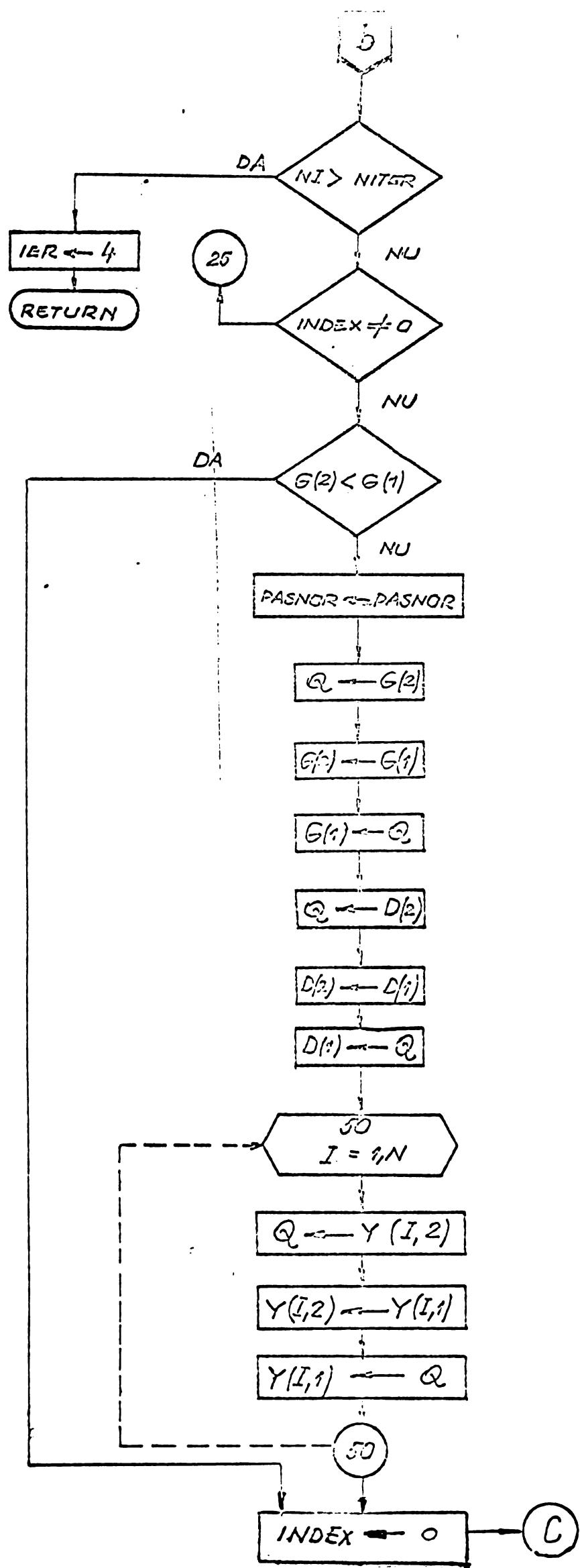
SCHEMA LOGICA A SUBPROGRAMULUI - MINIM

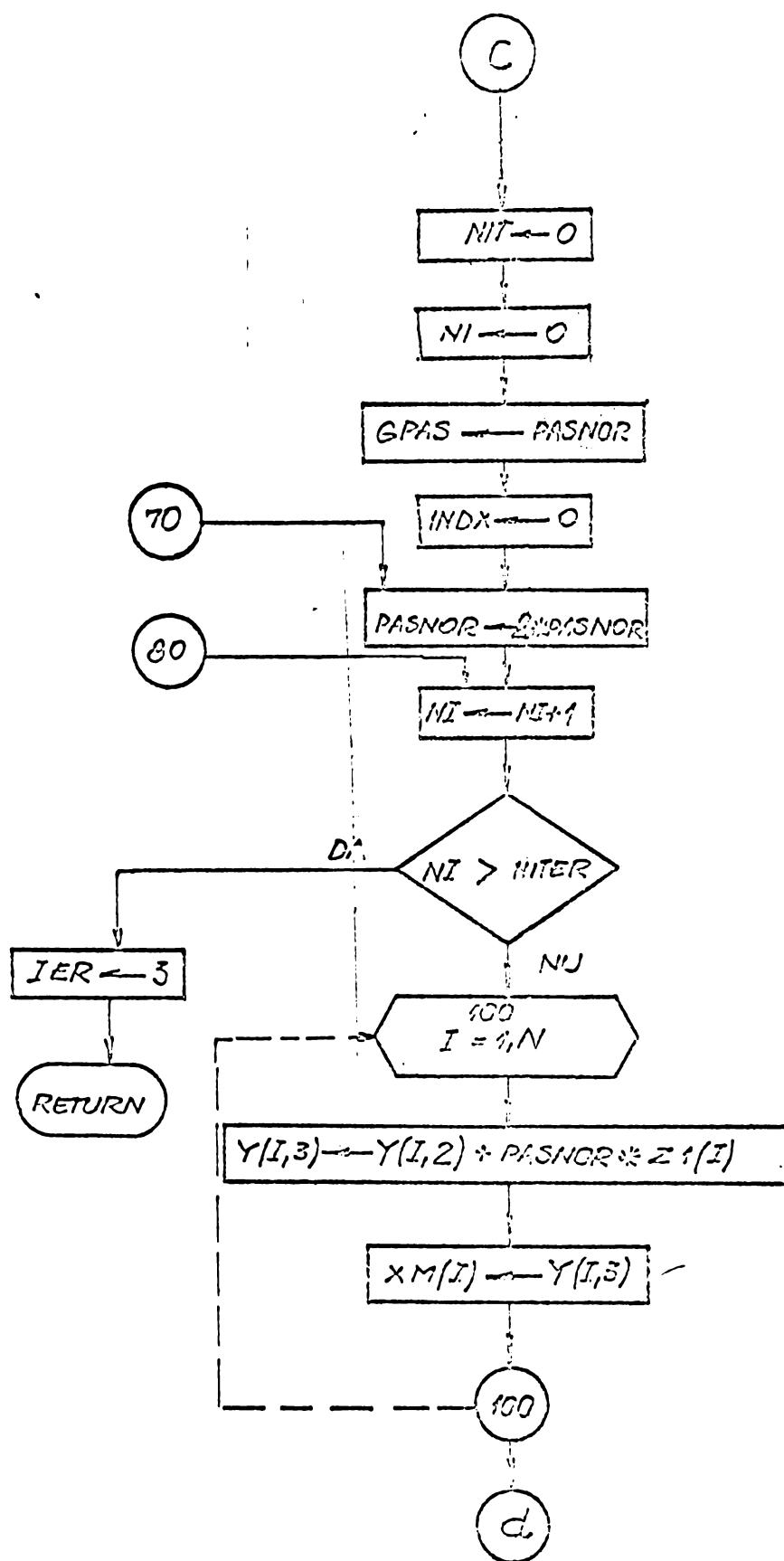
11 pagini

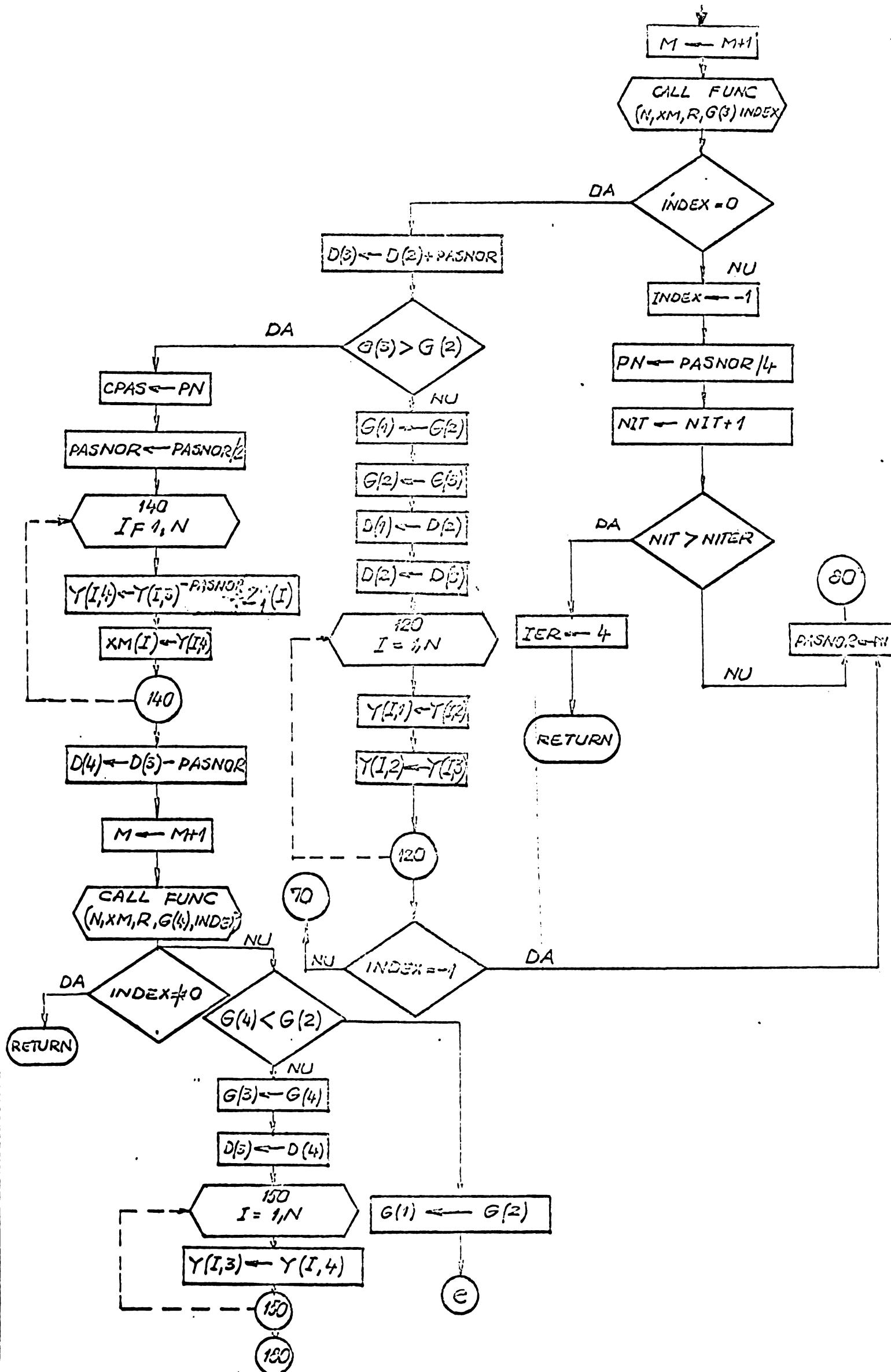
$x(20), x_M(20), x_1(20), x_2(20)$
 $z_1(20), Y(20,4), G(4), D(4)$

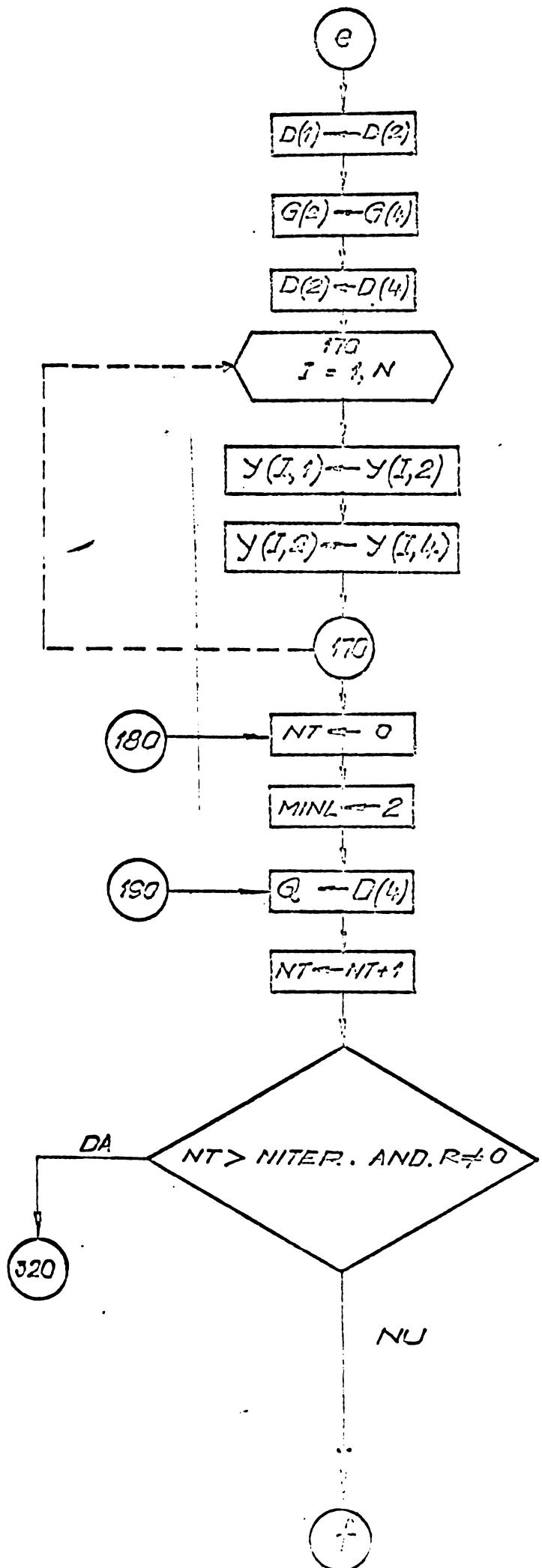


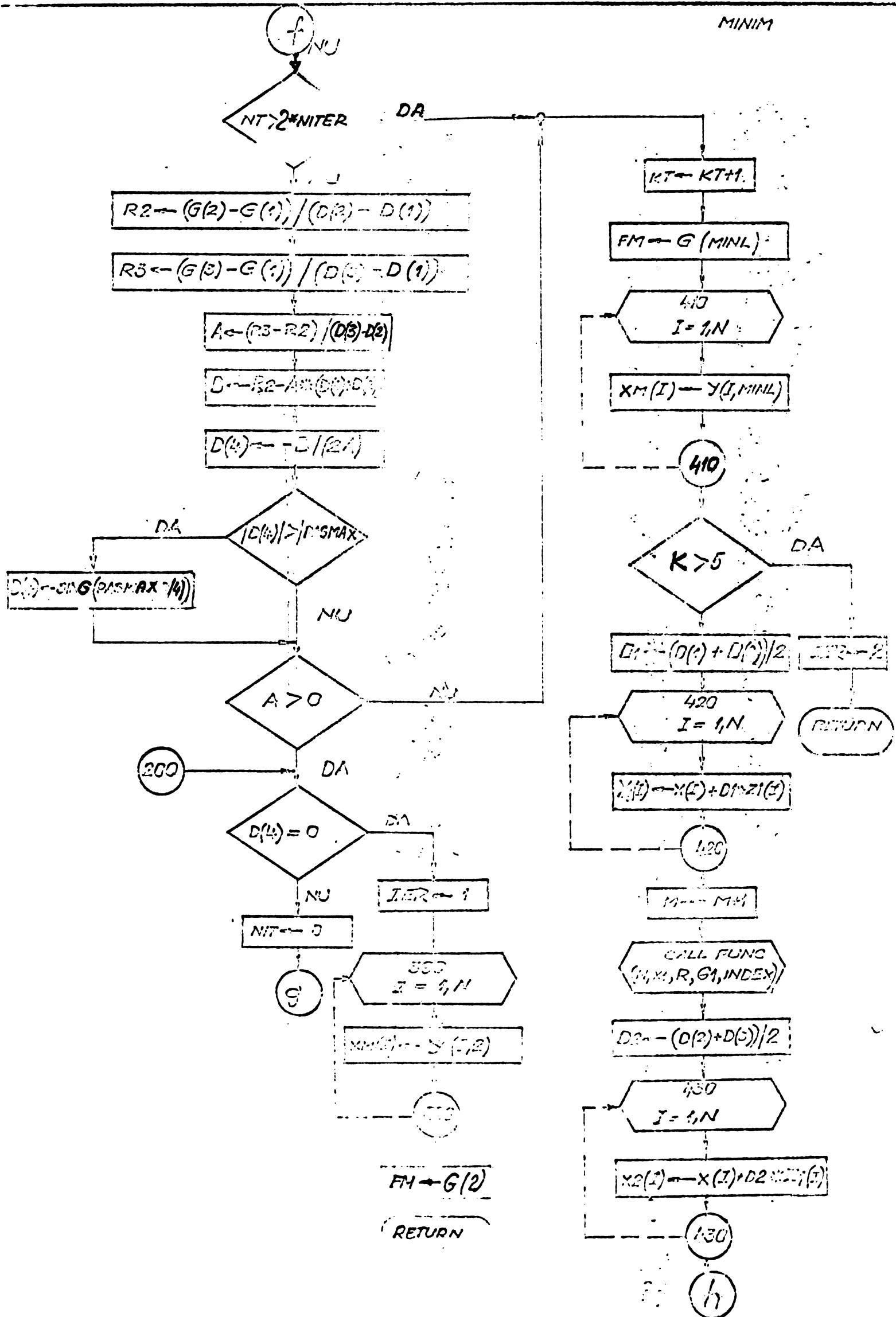


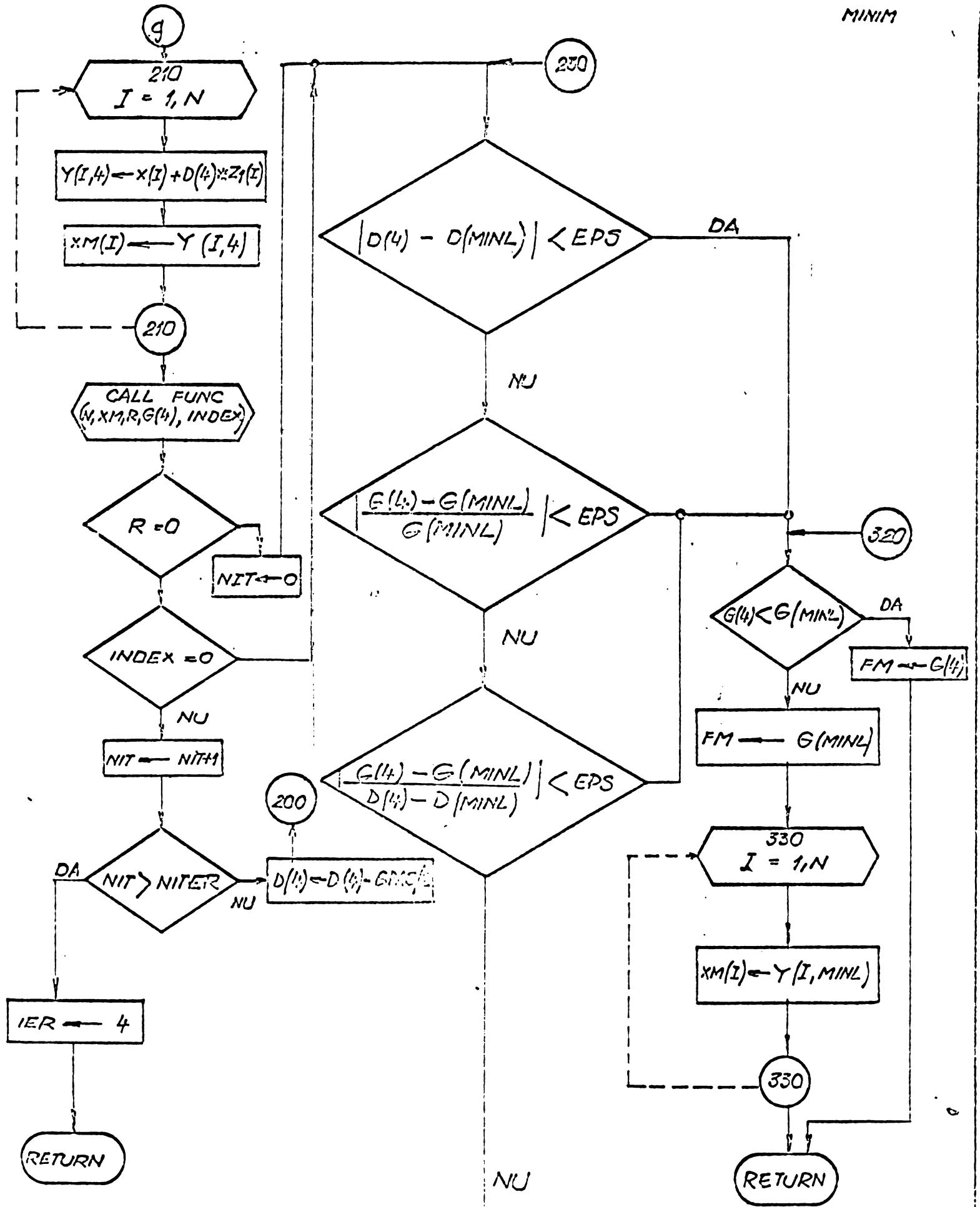


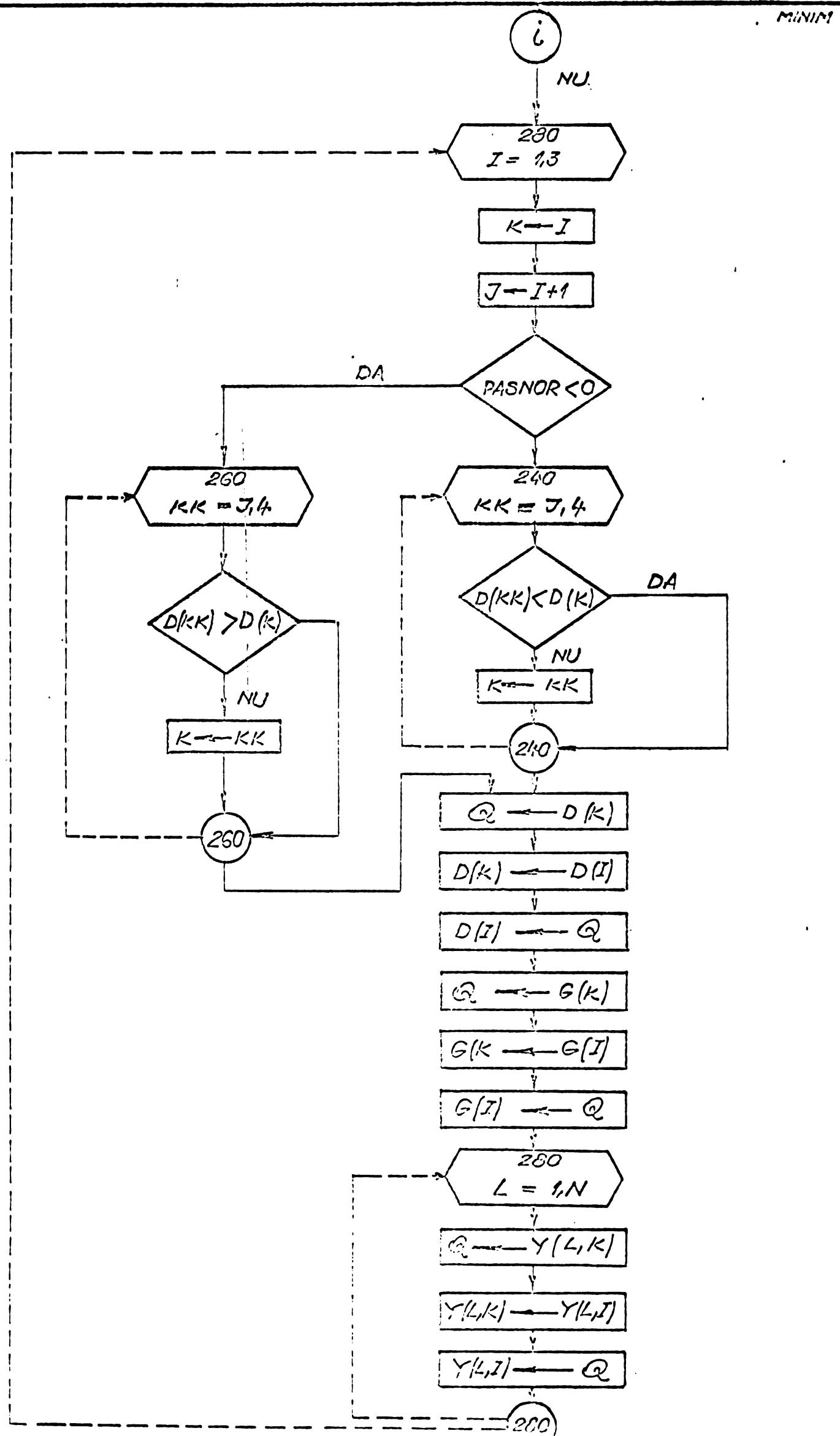


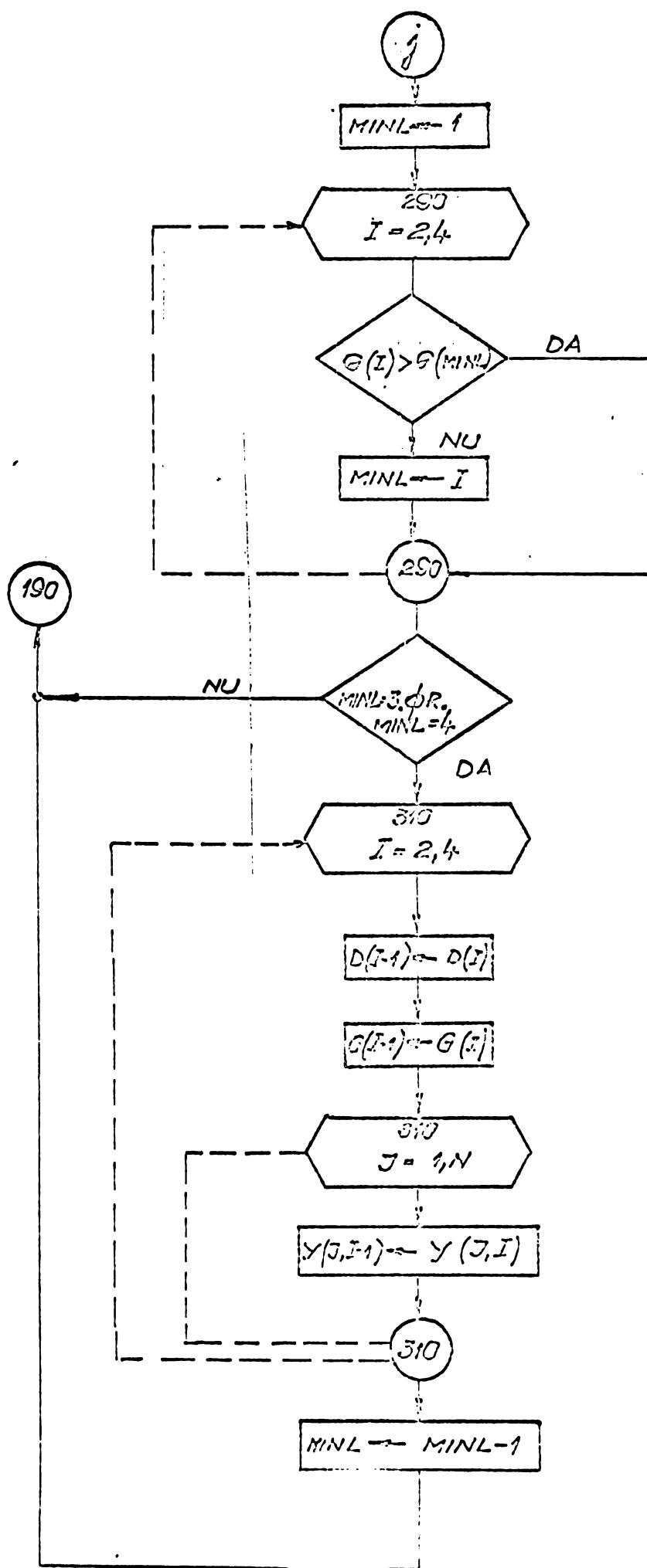


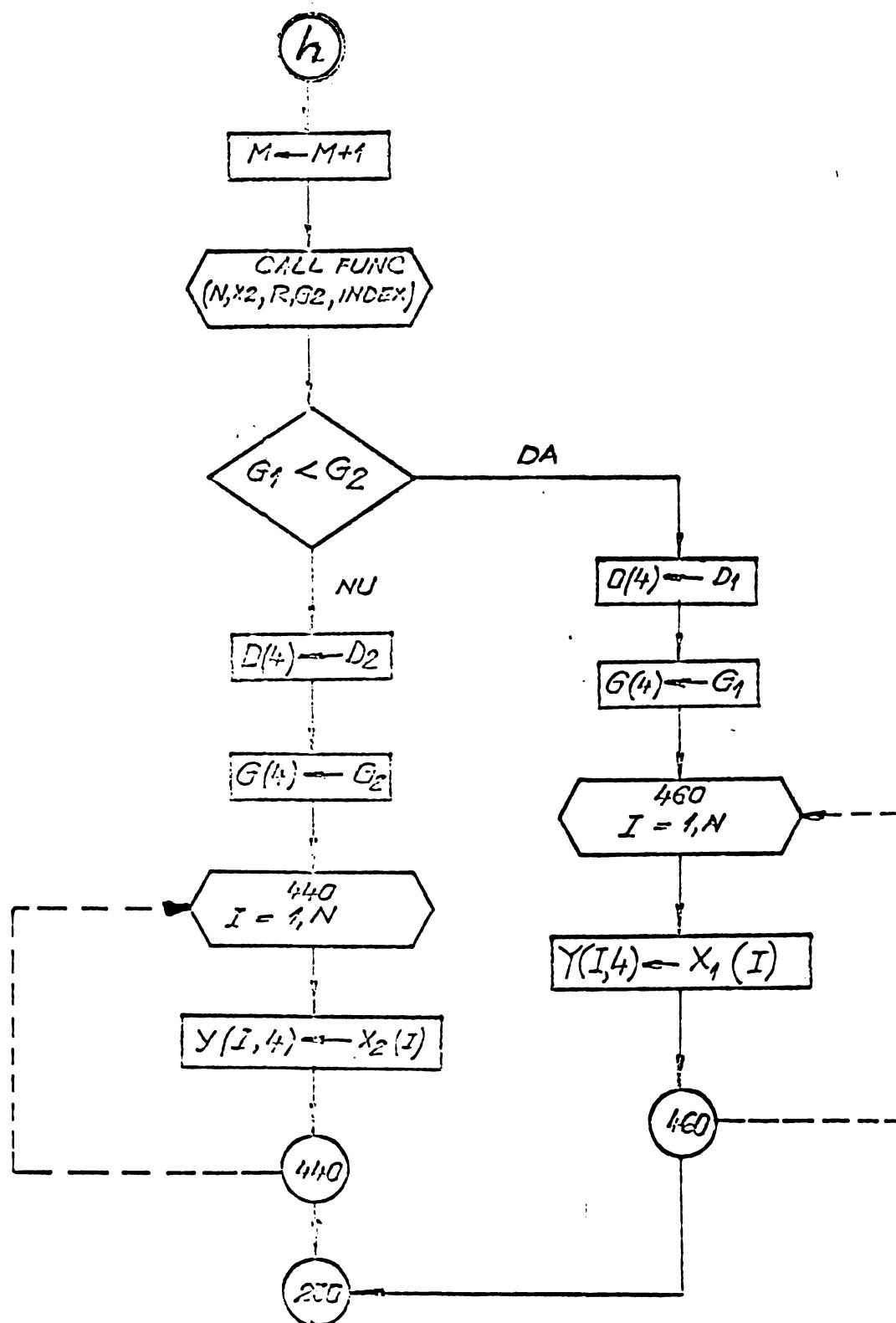


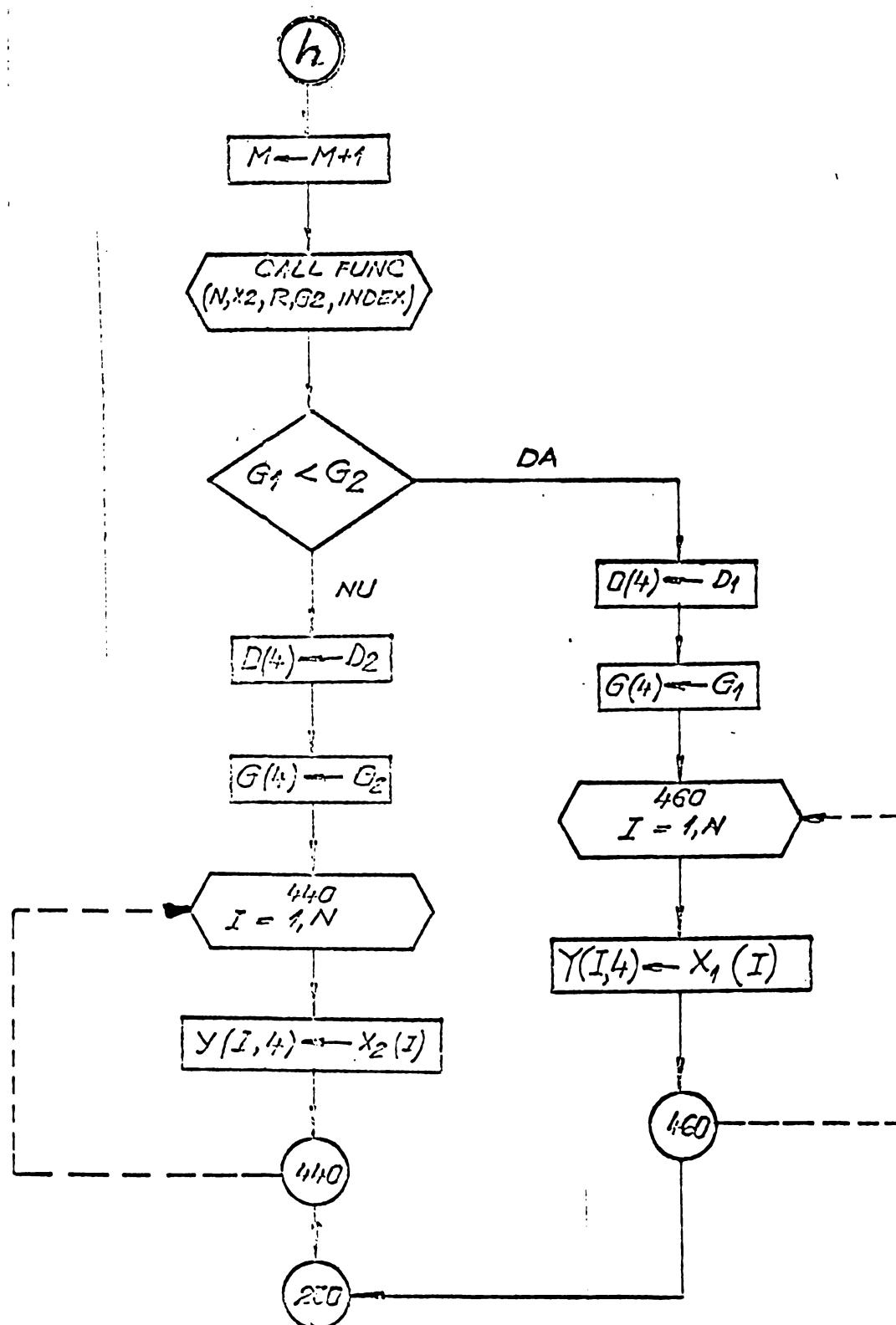








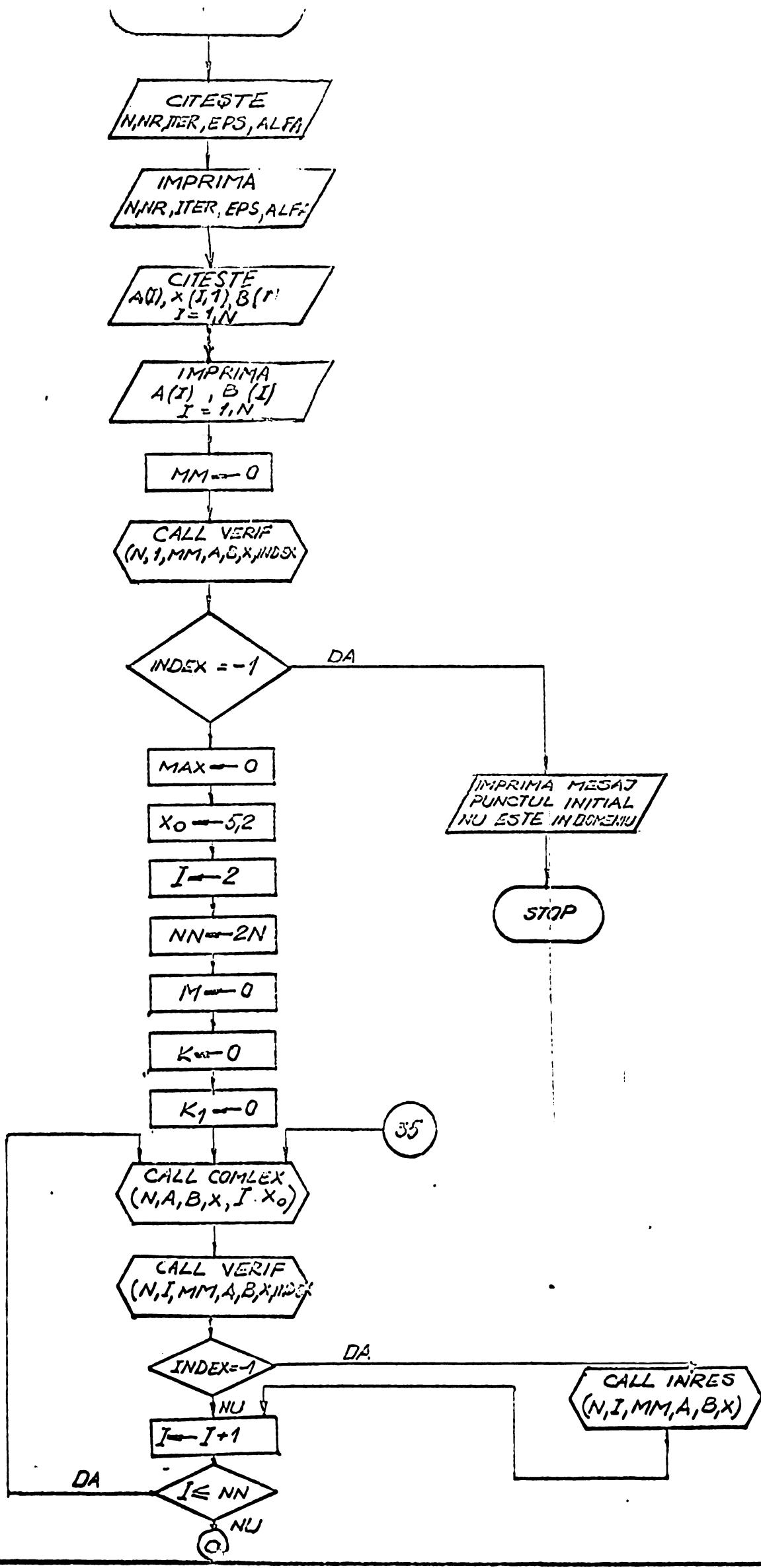


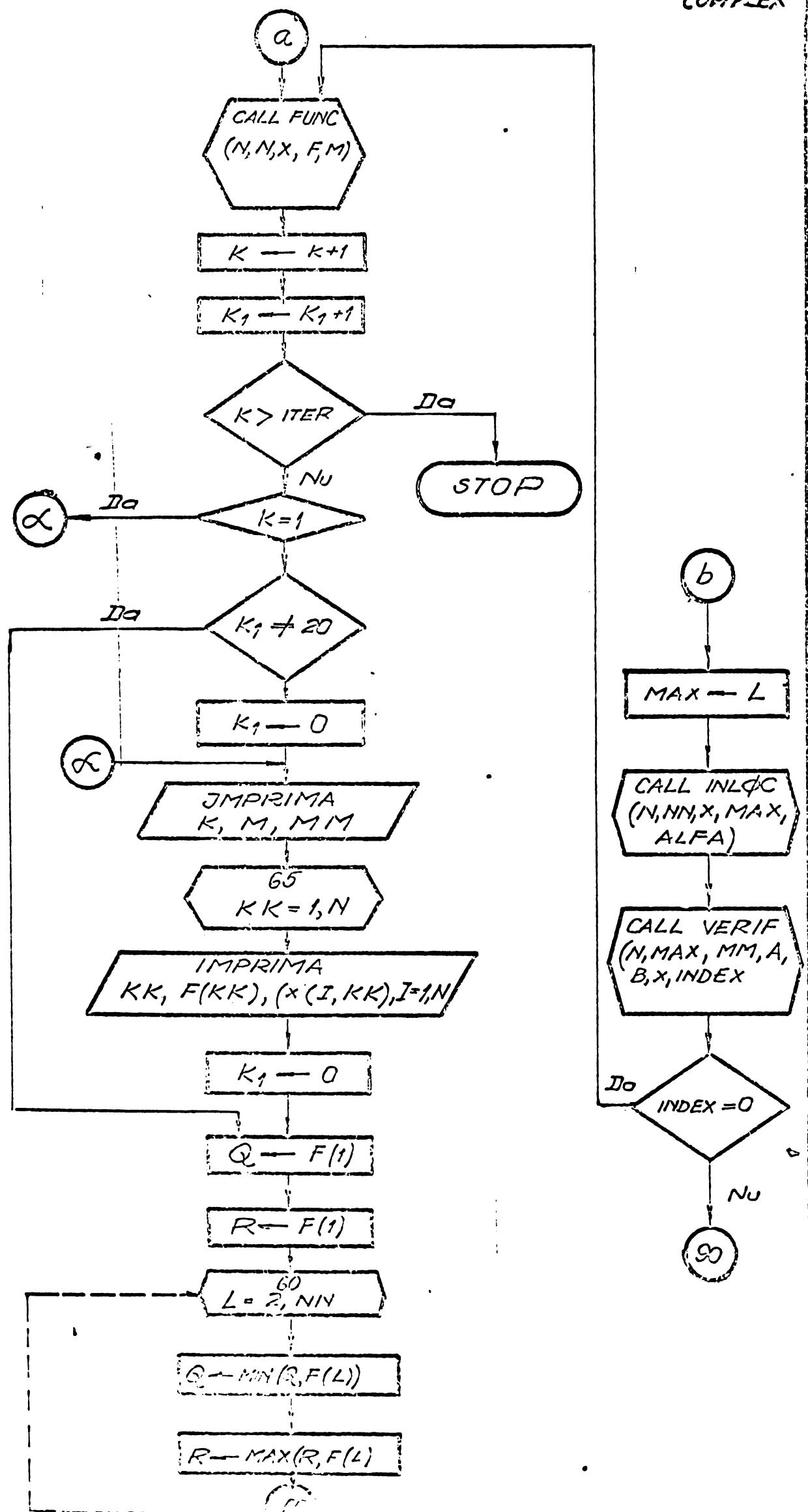


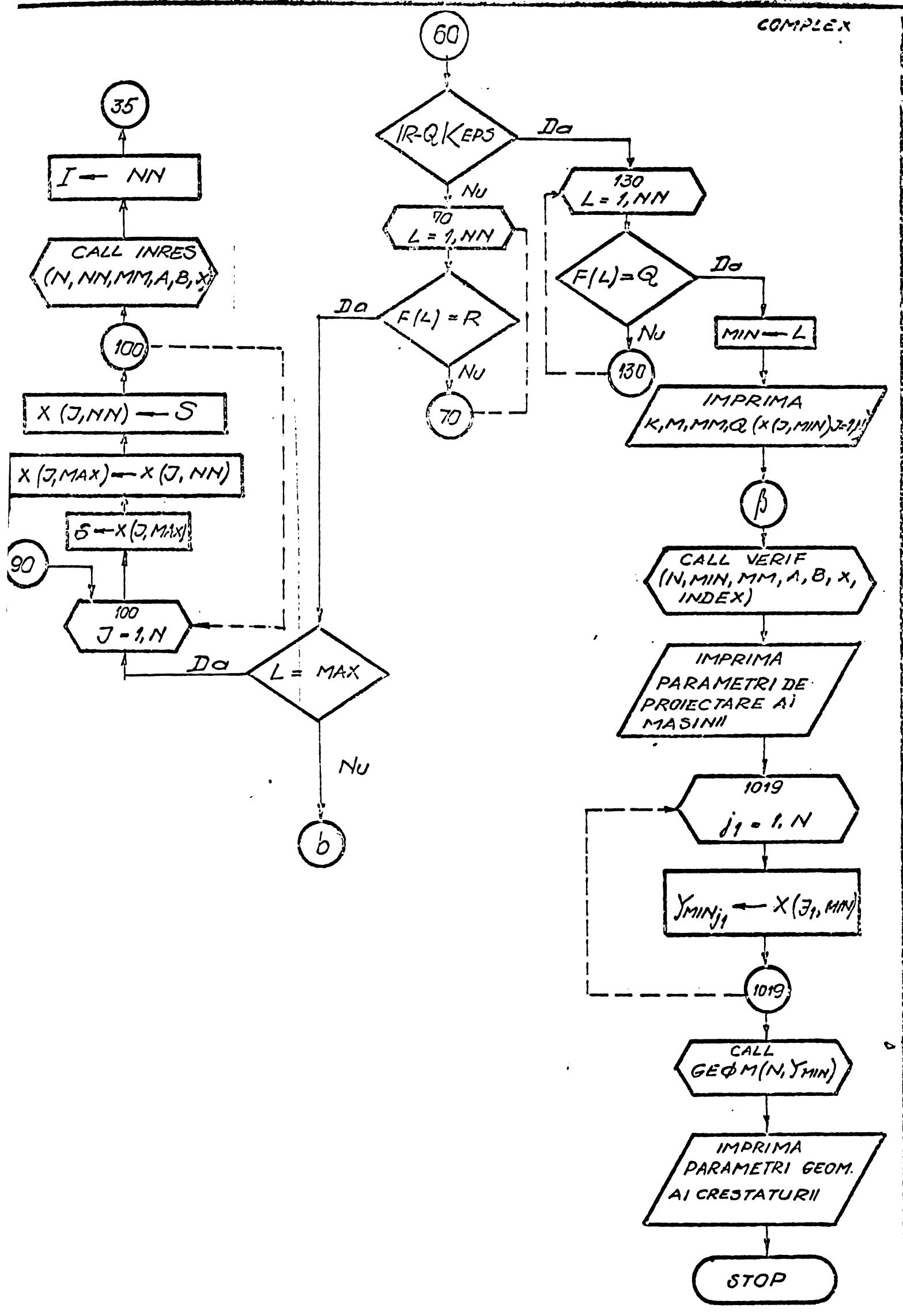
ANEXA NR. 17

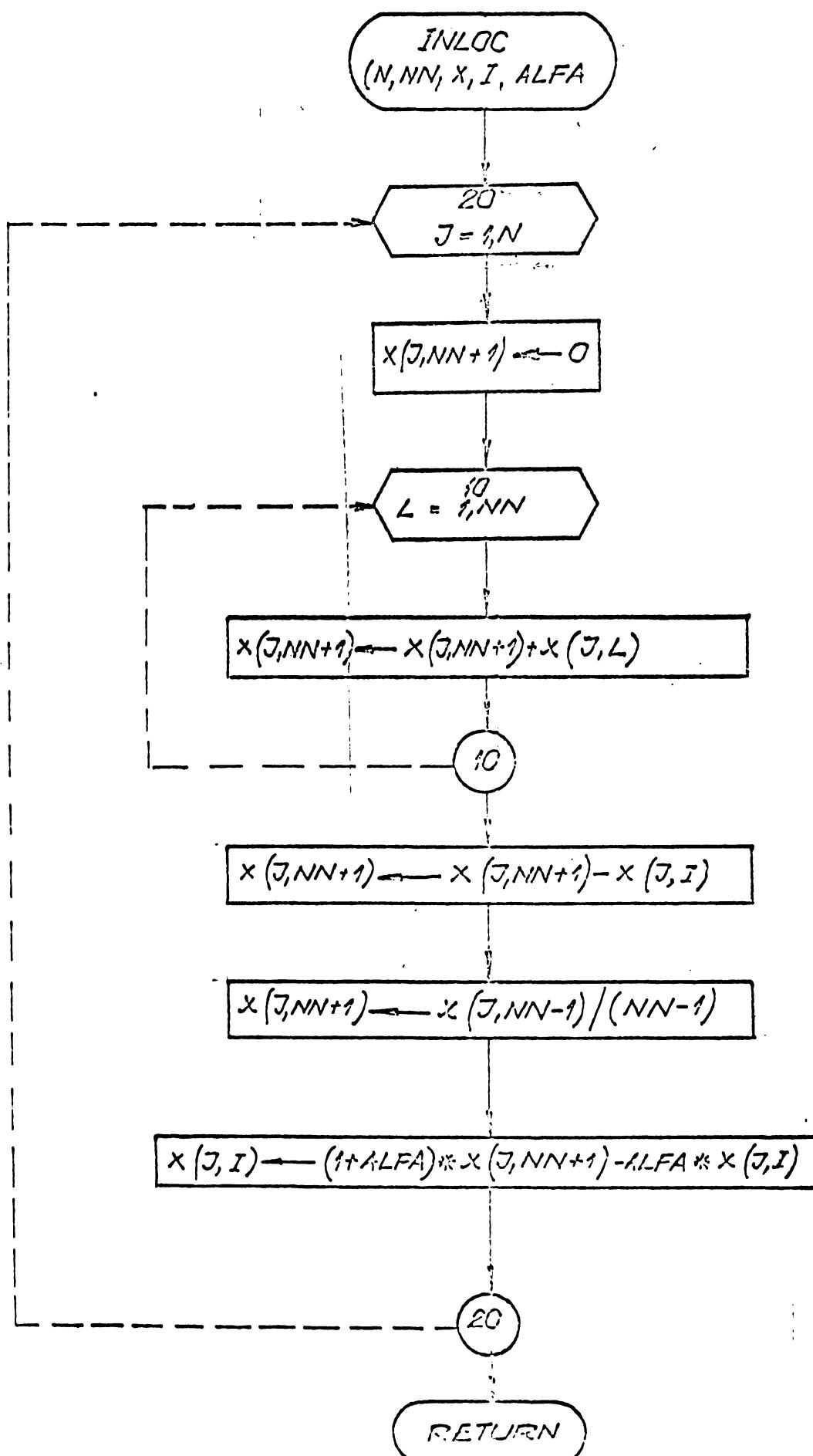
SCHEMA LOGICA A SUBPROGRAMULUI-COMPLEX

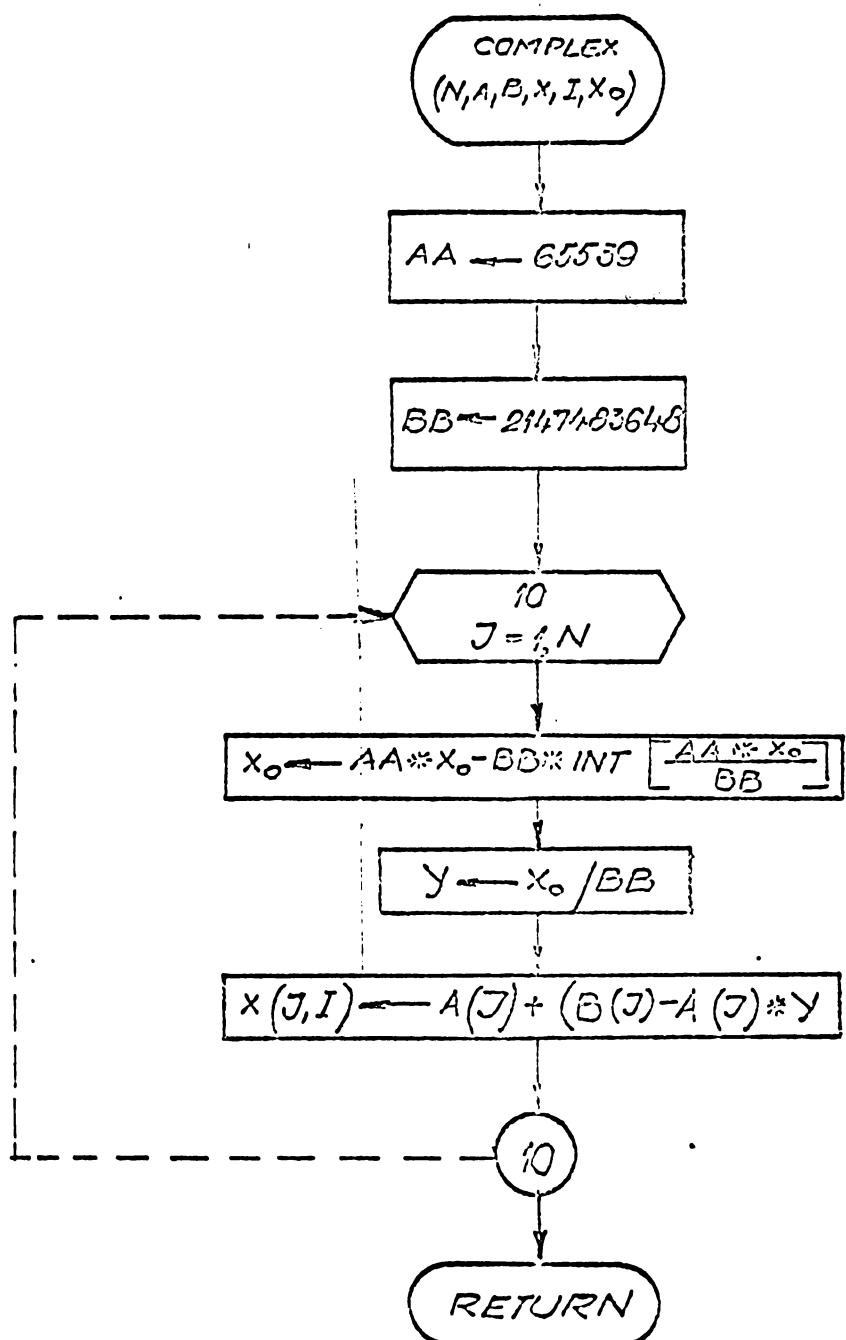
7 pagini

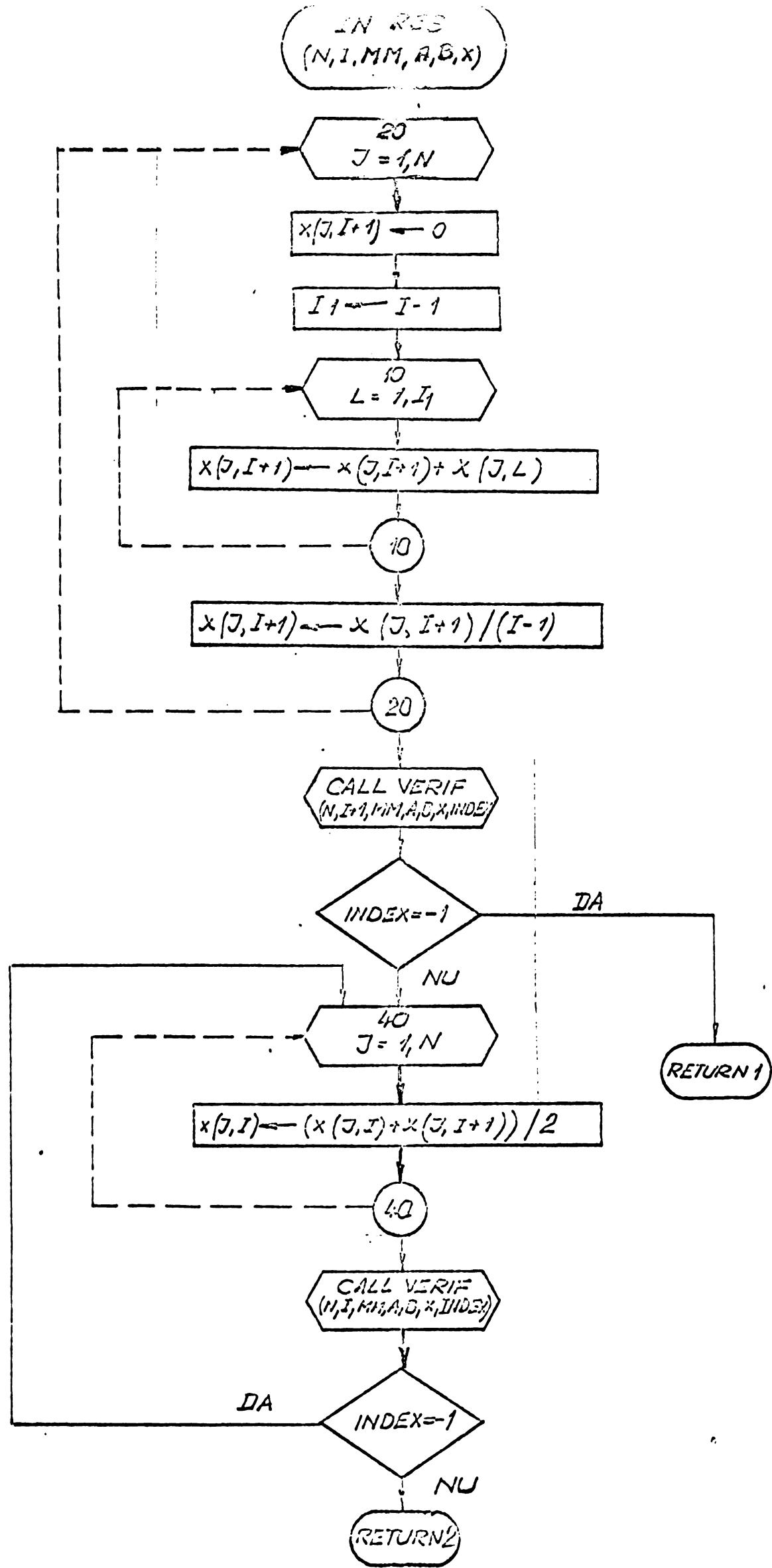


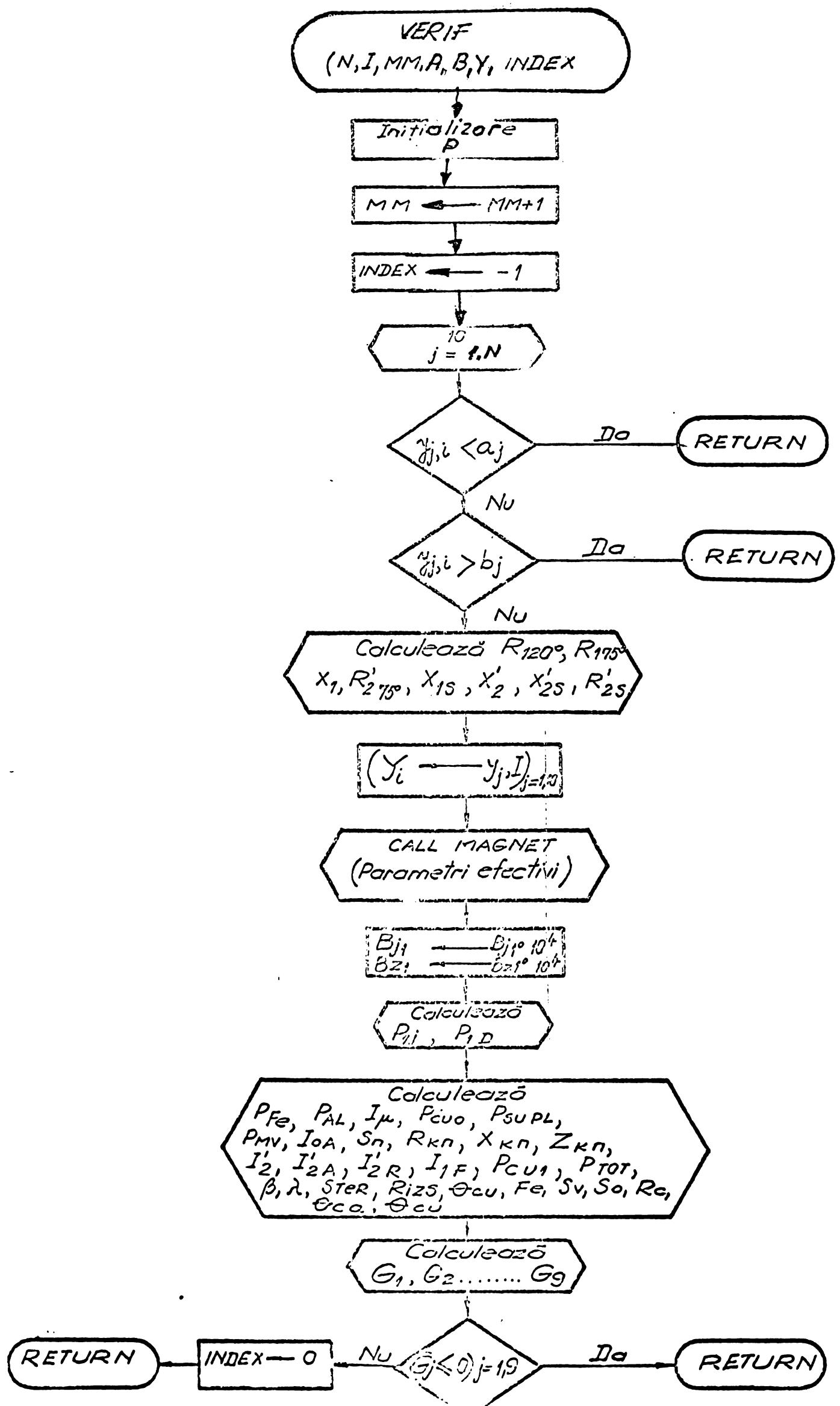








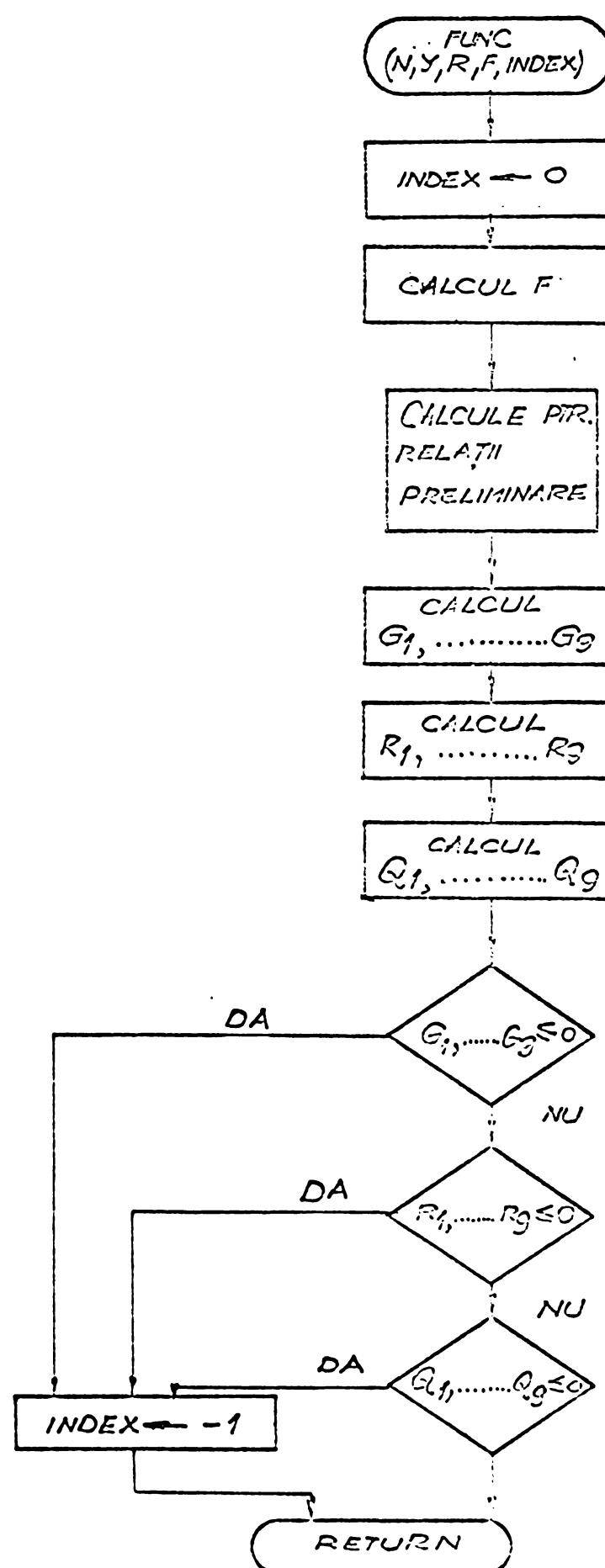




ANEXA NR. 16

SCHEMA LOGICA A SUBRUTINEI - FUNC

1 pagină



ପରିବାରକୁ ଯଦୁନାମଙ୍କଣ କରିବାକୁ ପରିବାରକୁ ଯଦୁନାମଙ୍କଣ କରିବାକୁ

۱۰

卷之三

૧૮

ଶୁଣୁ ଯାଏ କି କିମ୍ବା କିମ୍ବା କିମ୍ବା କିମ୍ବା କିମ୍ବା କିମ୍ବା କିମ୍ବା କିମ୍ବା କିମ୍ବା କିମ୍ବା

