

MINISTERUL EDUCATIEI SI INVATAMINTULUI
INSTITUTUL POLITEHNIC "TRAIAN VUIA" TIMISOARA
FACULTATEA DE ELECTROTEHNICA

Ing. BABESCU MARIUS

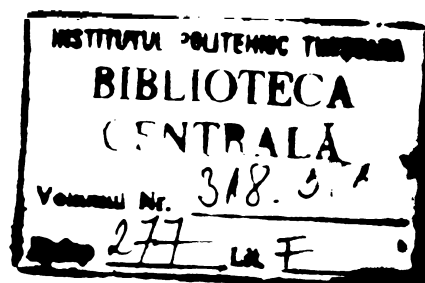
CONTRIBUTII LA CALCULUL MASINILOR
LINIARE DE INDUCTIE UNILATERALE

Teză de doctorat

CONDUCATOR STIINTIFIC
Prof.dr.ing. TOMA DORDEA

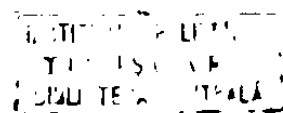
BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

Timisoara
- 1976 -



CUPRINS

	PG.
INTRODUCERE.....	4
Cap.I. <u>MASINILE LINIARE UNILATERALE</u>	8
I.1. Construcție.....	8
I.2. Fenomene specifice - efectul transversal	15
- efectul longitudinal	18
- forțe suplimentare	19
I.3. Metode de calcul - unidimensionale.....	23
- bidimensionale.....	25
- tridimensionale.....	30
Cap.II. <u>METODA STRATURILOR UTILIZIND SERII DUBLE FOURIER</u>	33
II.1. Principiul metodei; modelul matematic;	
factorul de calitate.....	33
II.2. Armonicile solenației primare.....	38
II.3. Ecuațiile câmpului electromagnetic.....	42
II.4. Inducția magnetică; densitatea de curent.	46
II.5. Calculul forțelor; calculul forței lon-	
gitudinale.....	47
- calculul forței normale.....	48
- calculul forței transversale.....	49
II.6. Putere, pierderi, η , $\cos \varphi$	50
II.7. Tensiunea la borne.....	55
II.8. Variația permeabilităților magnetice, a	
câmpului și a puterii straturilor	
indusului.....	57
II.9. Spectrul armonicilor solenației după	
axa longitudinală.....	60
II.10. Caracteristicile forțelor.....	63
II.11. Funcționarea M.L. în zona alunecărilor	
mici.....	66
II.12. Organigrama de calcul.....	68



	Pg.
Cap.III. <u>CALCULUL OPTIMAL AL M.L.U. FOLOSIND METODA STRATURILOR</u>	71
III.1. Criteriile de optimizare.....	72
III.2. Metoda de proiectare optimală.....	74
III.3. Pierderile active și reactive de putere în inductor.....	76
III.4. Masa inductorului; η , $\cos \varphi$	78
Cap.IV. <u>CALCULUL F.L. FOLOSIND METODA STRATURILOR.</u>	80
IV.1. Teoria F.L. cu excitația în c.c.	
- fenomene specifice.....	80
- solenația inductoare.....	82
- ecuațiile de câmp.....	83
- inducția magnetică.....	85
- rezultate teoretice.....	86
IV.2. Calculul optimal al F.L.	90
- criteriile optimale de proiectare.	90
- exemplu numeric.....	92
Cap.V. <u>METODE SIMPLIFICATE DE CALCUL A M.L.U.</u>	96
V.1. Calculul M.L.U. considerând ciclul de istereză al materialului indusului;	96
- calculul analitic.....	97
- calculul numeric.....	
V.2. Metodă grafo-analitică de calcul al M.L. cu indus feromagnetic-calculul curentului și a tensiunii	110
- rezultate teoretice.....	119
V.3. Calculul simplificat al M.L.U. considerând efectul transversal și cel de saturație; - calculul forțelor.....	121
- calculul parametrilor indusului.....	125'
- calculul tensiunii la borne, a randamentului și a factorului de putere.....	126
- rezultate teoretice.....	

Cap.VI. <u>REZULTATE EXPERIMENTALE SI APLICATIVE.</u>	127
VI.1. Incercări experimentale în regim dinamic	127
- la M.L.U.	
- la F.L.	
VI.2. Incercări experimentale în regim static	
la M.L.U. - şand încercări I.	132
- şand încercări II.	
VI.3. Exemplu numeric privind calculul opti-	
mal al M.L.U.	140
- criteriul de optimizare A ($\eta \cos \varphi$ -maxim)	
- criteriul de optimizare	
B ($p_m = P_{mec}/M_{ind}$ - maxim).....	
Cap. VII. <u>CONCLUZII</u>	149
Bibliografie	151

INTRODUCERE *

Mașina electrică liniară provine din mașina rotativă clasică prin desfășurarea acesteia din urmă într-un plan.

Se pot realiza, în principiu, M.L. din toate tipurile clasice de M.E. rotative, dar trebuie menționat faptul că M.L. nu poate fi privită ca un caz particular al M.R. și nici invers, aceasta datorită fenomenelor specifice rezultate în urma transformărilor topologice [C4].

Eliminarea angrenajelor, posibilitatea transmiterii unui efort de la un punct fix la unul mobil, fără contact mecanic, prin câmpul magnetic, impun M.L. în acțiunile cu mișcări rectilinii [L3].

Simplitatea, prețul scăzut și gradul ridicat de fiabilitate, sînt caracteristicile esențiale ale sistemelor acționate prin M.L.

În [C1] se demonstrează posibilitatea folosirii M.E. rotative de curent continuu sau asincrone în tracțiunea electrică pînă la viteze în jurul a 300 Km/h (318 Km/h cu turbotrenul TGVO01, în Franța), dar peste această viteză apar probleme care, se pare, că nu pot fi soluționate prin sistemul roată-șină.

Folosirea M.L. în tracțiunea electrică la viteze mari (300-500 Km/h) elimină problema aderenței, este nepoluant și asigură o accelerare și decelerare corespunzătoare [A4, A7, B4, B19, B28, L2]. Așa cum se poate observa din fig.O.1 a, timpul necesar parcurgerii distanțelor cuprinse între 100 Km și 1100 Km este mult mai redus în cazul folosirii vehiculelor cu M.L., comparativ cu celelalte mijloace de transport (avion, auto, etc).

În transportul urban și suburban utilizarea M.L. (distanța AB) are o serie de avantaje [33] față de mijloacele actuale (fig.O.1.b) [M1]. Ca dezavantaje ^{ole} unui astfel de motor sînt:

*În cuprinsul lucrării se folosesc prescurtările:
- M.E. - mașină electrică.
- M.L. - mașină liniară (M.L.U.-M.L.unilaterală)
- F.L. - frînă liniară.

conținerea întrefierului și factorul de putere mai redus. Factorul de putere depinde de viteza mașinii și la M.L. bine dimensi-

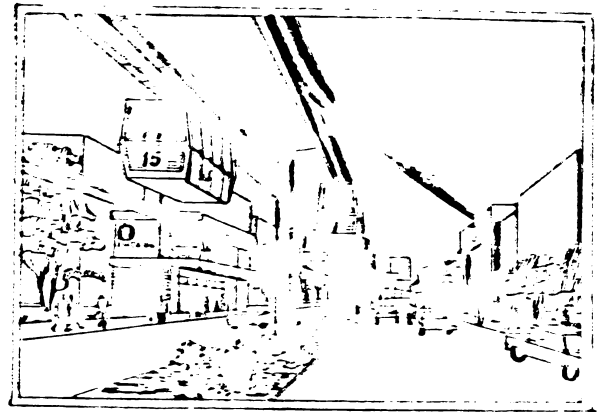
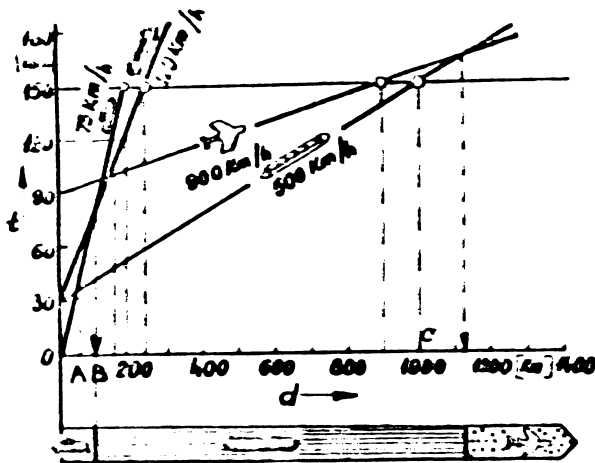


Fig. O.1.a. M.L. în transportul de mare viteză.

Fig. O.1.b. M.L. și transportul urban de persoane

nate este în jurul lui 0,7 [A4], iar randamentul aproximativ 0,8 [G1].

Luând în considerare randamentul global al acționării și economia realizată pe partea mecanică, rezultă că cei doi factori (randament, factor de putere) defavorabili M.L. în comparație cu mașina rotativă, nu sînt hotărîtori [M1, M4, M6, O4].

Avantajele M.L. apar distinct la viteze mari [W3, W4] unde raportul: greutate motor/unitate de putere este mult superior soluțiilor clasice bazate pe motoare rotative.

Prețul și eficacitatea energetică totală a instalațiilor acționate cu M.L. sînt motivele de natură tehnico-economică care au impus această mașină în atenția specialiștilor, făcînd posibilă apariția unor forme constructive foarte variate.

La M.L., numărul perechilor de poli, ca și valoare, nu e impus de viteză ($V_g = 2.3.f$), cum era fixat la mașina rotativă ($n_g = f/p$), în schimb - pasul polar - este acela ce impune viteza sincronă și pune probleme dificile la realizarea vitezelor mici (poduri rulante).

Lucrarea prezentă se încadrează în problematica actuală a cercetărilor din domeniul mașinilor electrice de inducție liniare unilaterale cu indus din aluminiu pe fier masiv, mai puțin elucidată în literatura de specialitate [R 4, E 2].

În cap.1. se prezintă modurile constructive posibile ale M.L.U., făcându-se o clasificare a lor. Se tratează într-un mod unitar fenomenele specifice M.L.U. și se dau metodele de calcul existente în literatură precum și cele propuse de autor.

În cap.2. se prezintă o metodă nouă de abordare, bazată pe seriile duble Fourier (metoda straturilor) și în care se consideră saturația miezului feromagnetic al indusului.

Se calculează caracteristicile de funcționare ale M.L.U.

În cap.3. se aduc contribuții originale cu un pronunțat caracter practic aplicativ, care se referă în principiu la dimensionarea optimă a M.L.U.

În cap.4. se aplică metoda straturilor la calculul F.L. cu excitația în c.c. Pe baza programului de calcul întocmit, se determină dimensiunile geometrice optime pentru F.L. folosite în transportul de mare viteză [300 + 500] Km/h .

În cap.5. se prezintă trei metode simplificate de calcul al M.L.U. Prima metodă ia în considerare ciclul de istereză magnetică a materialului indusului printr-un procedeu analitic și printr-un procedeu numeric. În a doua metodă se utilizează traterea grafo-analitică.

Metoda a treia, aplicabilă la calculul M.L. de viteze mici și medii, ia în considerare efectul transversal și cel de saturație.

În cap.6. se prezintă instalațiile experimentale folosite pentru verificarea principalelor rezultate teoretice din lucrare. S-au efectuat încercări în regim static și dinamic pe 3 prototipuri de M.L. executate în acest scop. Contribuțiile originale sînt următoarele:

1. Analiza critică și comparativă a metodelor de calcul propuse în literatură, făcându-se și o clasificare a lor.

2. Elaborarea unei noi metode de calcul (metoda straturilor) a performanțelor M.L.U., în care se consideră efectul de saturație ce intervine în indus.

3. Deducerea expresiilor de calcul a forțelor, după cele 3 direcții, a randamentului, a factorului de putere și a tensiunii la borne.

4. Intocmirea programului de calcul în limbaj Fortran IV și rularea lui pe un calculator FELIX C-256.
5. Elaborarea unei metode de proiectare optimală a M.L.U.
6. Elaborarea unei teorii a F.L. cu excitația în c.c.
7. Efectuarea unui calcul optimal al F.L.
8. Considerarea ciclului de istereză magnetică al materialului indusului și calculul M.L.U. printr-un procedeu analitic și numeric.
9. Elaborarea unei metode simplificate grafo-analitice de calcul pentru M.L.U.
10. Efectuarea unui calcul simplificat al M.L.U. considerând efectul transversal și cel de saturație.
11. Conceperea și realizarea a 3 instalații experimentale pentru încercarea M.L.

Rezultatele teoretice și experimentale ale lucrării au fost valorificate în contracte de cercetare, avându-se în vedere aplicarea M.L.U. la propulsia vehiculelor rapide, la acționarea podurilor rulante și a jgheaburilor rulante din industria carboniferă.

Autorul exprimă recunoștința sa tovarășului profesor Toma Dordea pentru precizările date și înalta sa competență, care au fost de cea mai mare importanță în elaborarea acestei lucrări.

Colegului dr.ing. Ion Boldea, autorul îi mulțumește pentru colaborarea utilă avută cu dînsul și pentru colegiala sa îndrumare.

Tuturor colaboratorilor autorul ține să le exprime pe această cale mulțumirile lui.

Cap.I.

MASINI DE INDUCTIE LINIARE UNILATERALE.

(Construcție; Clasificare; Fenomene specifice;
Metode de calcul al performențelor)

Varianta unilaterală a M.L. asincrone, în comparație cu cea bilaterală, prezintă o serie de avantaje constructive:

- plasarea orizontală a indusului (fig.1.1) nu pune probleme deosebite privind înscrierea în curbe (la varianta bilaterală, raza de curbură este limitată de mărimea întrefierului și de lungimea mașinii);

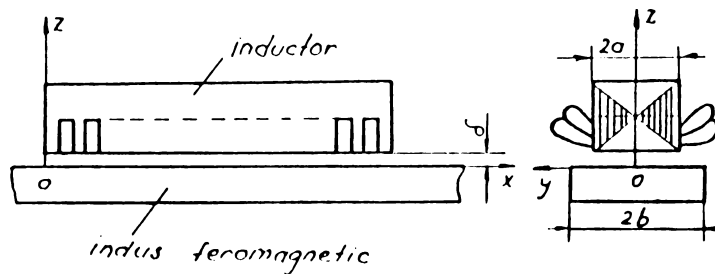


Fig.1.1. Motor liniar unilateral cu indus feromagnetic.

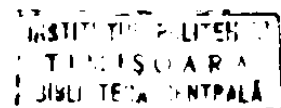
- forța normală ce apare este capabilă să preia o parte din greutatea vehiculului, sistemul de rulare sau suspensie fiind mai simplu;

- indusul este ușor de executat și rezultă o construcție mai ieftină [R 4, E 2] .

În unele acționări, (transportul uzinal al profilelor în metalurgie, acționarea podurilor rulante, transportul minier), M.L. unilateral este constructiv impus.

I.1. Construcție.

I.1.1. Din punctul de vedere al câmpului de excitație, M.L. unilaterală se poate executa sub următoarele forme:



1. M.L. plană $\left\{ \begin{array}{l} \text{cu flux longitudinal (fig.1.1.)} \\ \text{cu flux transversal (fig.1.2).} \end{array} \right.$
2. M.L.tubulară (cu flux longitudinal sau transversal) fig.1.3.
3. M.L. cu excitația $\left\{ \begin{array}{l} \text{în curent alternativ} \\ \text{în curent continuu - F.L.} \end{array} \right.$

M.L. cu flux longitudinal rezultă din desfășurarea în plan a maginii asincrone rotative și a fost obiectul de studiu a diverselor lucrări de specialitate [B1 + B22]. Indusul fiind din aluminiu pe fier, problema dificilă ce apare în calcule, este variația permeabilității magnetice în raport cu încărcarea.

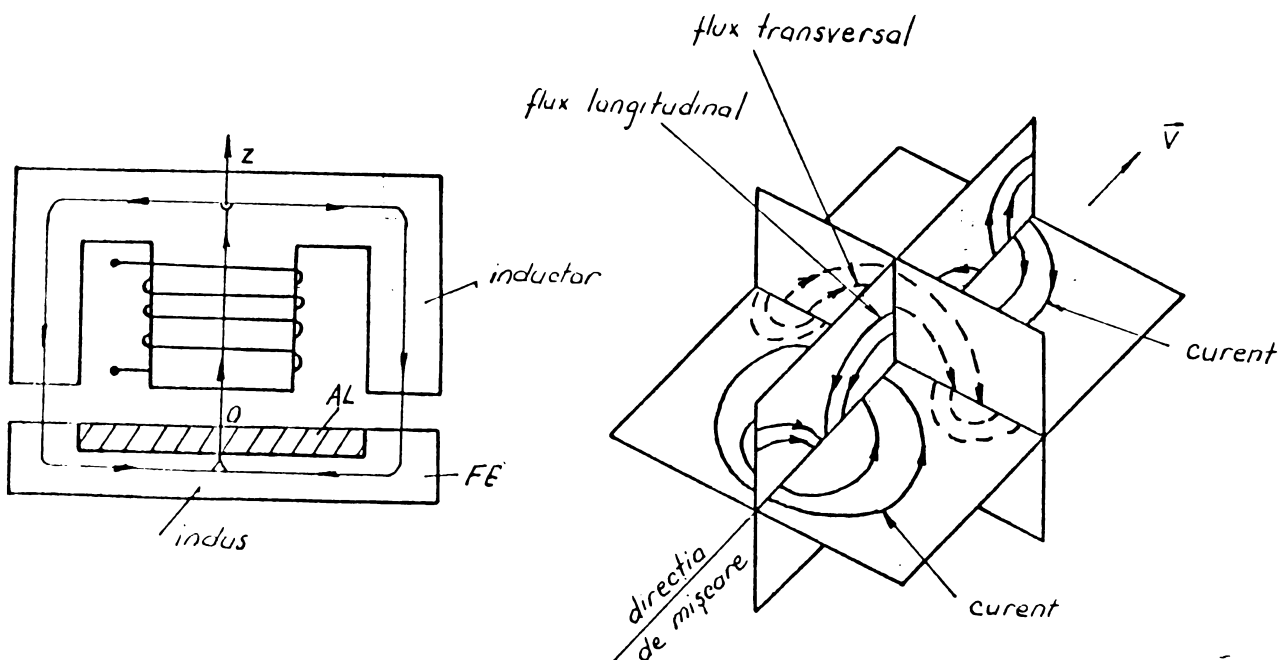


Fig. 1.2. Motor liniar cu flux transversal.

M.L. cu flux transversal este d.p.d.v. topologic complet diferit de varianta anterioară, aceasta datorită liniilor de câmp magnetic care nu se mai situează într-un plan paralel cu mișcarea, ci într-un plan perpendicular pe direcția de mișcare. Această formă de execuție are avantaje la pași polari mari și de asemenea poate fi utilizată la levitația vehiculului [L 5].

M.L. tubular poate fi privit ca un M.L. cu flux longitudinal, cu indusul un cilindru feromagnetic cu sau fără

strat de Al. Performanțele unui asemenea motor sînt superioare unei M.L. plane, aceasta datorită absenței efectului transversal și a unei puteri utile mai mari pe aceeași unitate de lungime.

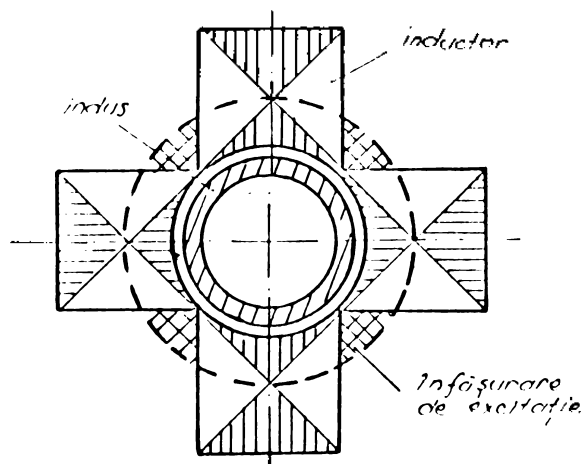


Fig.1.3. Motor linier tubular cu indus feromagnetic.

M.L. tubular, avînd în vedere construcția lui, se poate utiliza numai pe distanțe reduse, sub 2 m (uși de lift, întreprinderi, separatoare).

D.p.d.v. constructiv, M.L.U. se poate realiza:

- cu indusul lung și inductorul scurt
- cu indusul scurt și inductorul lung.

Inductorul poate fi:

- fix (avantaj la alimentare);
- mobil (problemă la captarea curentului la viteze mari [D 3]);

D.p.d.v. al sistemului de tensiuni cu care se alimentează mașina se deosebesc:

- M.L. polifazate (cele tratate anterior) și cele monofazate cu condensator care sînt în fond mașini bifazate;
- M.L. monofazate (fig. 1.4.) cu poli ecranaj;
- M.L. alimentate în c.c. - F.L. cu excitația în c.c.

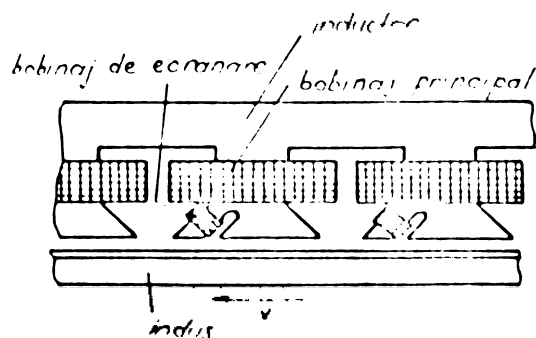


Fig.1.4. Motor linier monofazat cu indus din aluminiu pe fier.

INSTITUTUL POLITEHNIC
TIMIȘOARA
BIBLIOTECA CENTRALĂ

1.1.2. După domeniul de utilizare distingem:

- M.L. pentru obținerea unui efort în regim static, sau la viteze mici (ex.: uși de lift, tramvaie, întreruptoare) .

- M.L. folosite la imprimarea unei energii cinetice unei mase (ex.: instalația de încercare a caroseriilor "CRASH-TEST", poduri rulante)

- M.L. care dezvoltă în mod continuu o forță de propulsie (ex.: transporturile urbane și interurbane cu vehicule echipate cu M.L., transporturile cu benzi).

1.1.3. Infășurările M.L.

Se folosesc, în prezent, următoarele tipuri de infășurări:

- infășurări în două straturi cu număr impar (sau par) de poli și creștături marginale semibobinate (fig.1.5.b);

- infășurări în două straturi cu toate creștăturile pline (fig.1.5.a. [B 17]);

- infășurări cu creștături libere în zonele marginale (fig. 1.5.c); [02]

- infășurări inelare (tip Gramme) (fig. 1.6)

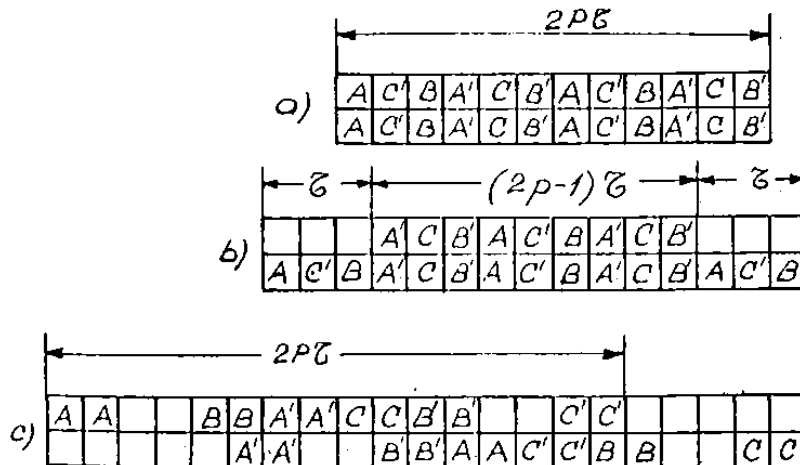


Fig. 1.5. Infășurări polifazate în tambur pentru M.L.

Infășurările de forma (1.5 a) provin din infășurările clasice ale mașinilor rotative asincrone și prezintă unele dezavantaje d.p.d.v. al efectului longitudinal, datorită componentei alternative a cimpului magnetic.

Infășurările de forma (1.5 b) dau rezultate bune la M.L. de mică și medie viteză unde componenta alternativă a cîm-

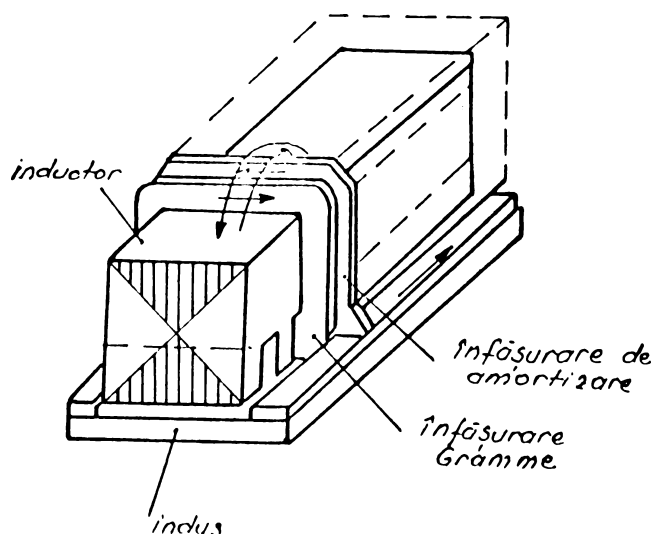


Fig. 1.6. Infășurări inelare (tip Gramme) pentru M.L.

pului are o pondere mică.

O anulare a componentei alternative a cîmpului din jug se obține cu infășurările de tip (1.5 c), propuse pentru prima dată în [02]. Asemenea tipuri de infășurări au o importanță deosebită în situația folosirii unui jug masiv în secundar, deoarece permite alegerea unei grosimi pentru placa indus mult redusă (impusă numai de componenta alunecătoare a cîmpului).

La pași polari de (0,25 + 0,35 m) sînt recomandabile infășurările inelare (tip Gramme).

În fig. 1.6 este reprezentată o infășurare tip Gramme avînd și o infășurare de amortizare pentru diminuarea fluxului de dispersie. O infășurare inelară pentru M.L. cu dublă acțiune este dată în fig. 1.7 a.

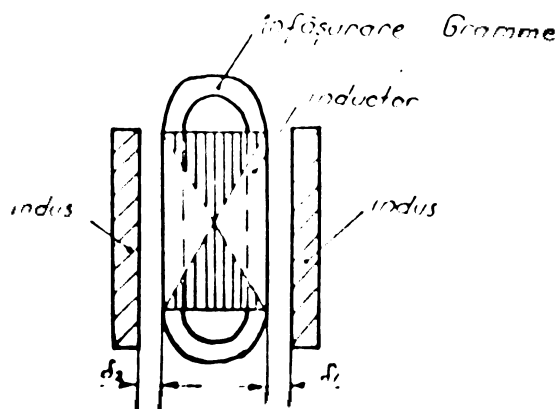


Fig.1.7 a. Infășurare tip Gramme cu dublă acțiune.

INSTITUTUL POLITEHNIC
TIMIȘOARA
BIBLIOTECA CENTRALĂ

Există prototipuri de M.L. fabricate de A.E.G. cu o înfășurare de forma din fig. 1.7 a. pentru vehicule de mare viteză, prototipuri ce au raportul: greutate motor/unitate de putere, cel mai scăzut în gama M.L. Problemele deosebite ce le ridică o asemenea variantă sînt legate numai de execuția căii de rulare care trebuie să aibe 2 inducși și deci preț de cost ridicat.

Schema de principiu a unei înfășurări pentru M.L. cu flux transversal este dată în fig. 1.7 b.

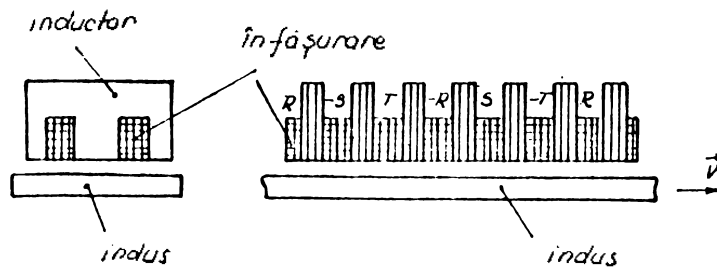


Fig.1.7 b. Înășurarea M.L. cu flux transversal.

În fig. 1.7 c. se arată modul de conectare a bobinelor pentru M.L. tubular, bobinat într-un strat. Bobinele sînt circulare și dispuse concentric cu indusul.

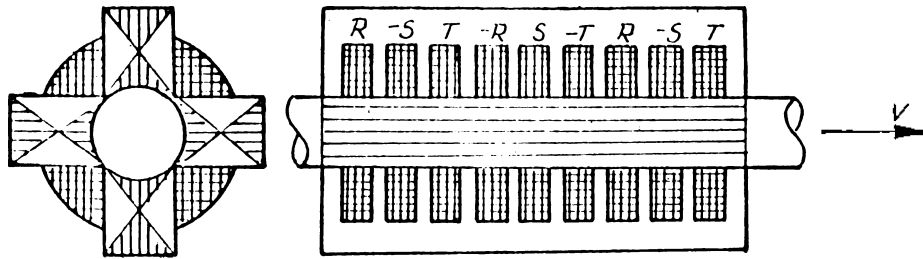


Fig.1.7.c. Înășurarea M.L. tubular.

I.1.4. Indusurile M.L.

Alegerea tipului de indus se face avînd în vedere următoarele două aspecte:

- caracteristica mecanică: $F = f(V)$, care este cerută de utilajul acționat;

- prețul de cost al căii de rulare;

Indusul M.L.U. se poate prezenta sub una din formele:

1. indus masiv feromagnetic (placă de fier laminat care este sediul câmpului electric și magnetic);
2. indus cu bare din aluminiu sau cupru plasate în adâncituri executate în:
 - fier masiv laminat
 - tole, asemenea unui indus cu rotor în colivie;
3. indus tip "sandwich" format dintr-o tablă de aluminiu sau cupru așezată pe fier masiv (este o variantă intermediară între primele două).

Pentru cele 3 variante principale prezentate, prețul de cost este în creștere în ordinea 1,3,2.

Caracteristicile mecanice pentru cele 3 variante sînt date în fig. 1.8.

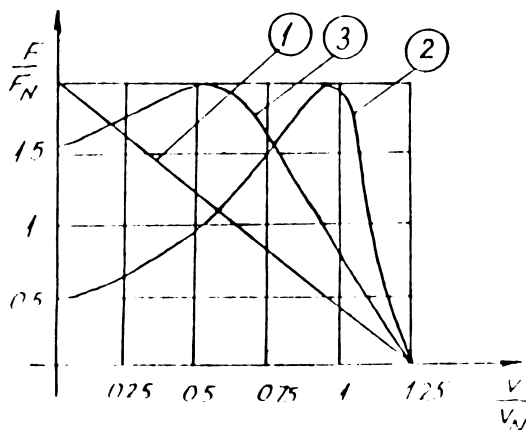


Fig.1.8. Caracteristicile mecanice la diferite tipuri de indus.

Pentru varianta 1, caracteristica mecanică este practic liniară în domeniul de motor, forța de pornire fiind cea mai mare, ceea ce este avantajos pentru anumite aplicații.

În varianta 2 caracteristica mecanică are aceeași aliniere ca la motorul cu rotorul în colivie, prezentînd un maxim în domeniul de motor.

Caracteristica mecanică, în varianta 3, este intermediară celor două caracteristici precedente, putîndu-se influența

la prin grosimea plăcii nemagnetice, conductoare și prin mărirea pasului polar.

I.2. Fenomene specifice.

Formei constructive a M.L. îi este specifică o serie de fenomene, care se manifestă sub forma a 3 efecte:

- a) efectul transversal;
- b) efectul longitudinal;
- c) forțe suplimentare;

I.2.1. Efectul transversal.

Datorită lățimii finite a M.L., curenții turbionari induși au o traiectorie eliptică de forma indicată în fig.1.9, prezentând două componente: i_y - componenta utilă, ce dă forța longitudinală și componenta neutilă i_x pe baza căreia apare forța transversală.

Componenta utilă a curențului indus, i_y , produce un flux de reacție ce urmează o cale comună cu fluxul de excitație principal și este opus acestuia, pe cînd componenta neutilă, i_x , produce un flux de reacție în zonele marginale ce se adună fluxului principal, în întrefierul mașinii rezultînd o variație a inducției pe lățime, de forma dată în fig.1.10, cu un minim la mijloc și un maxim spre margini [B 11]. Fizic, acest fenomen poate fi privit ca o redistribuire transversală a cîmpului magnetic rezultat din întrefier, ținînd seama că în zona centrală reacția e mai puternică.

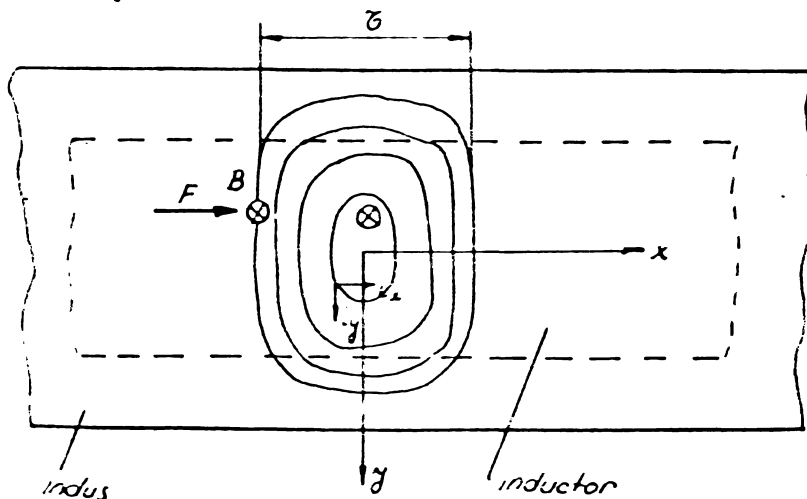


Fig.1.9. Forma liniilor de curent din indusul feromagnetic.

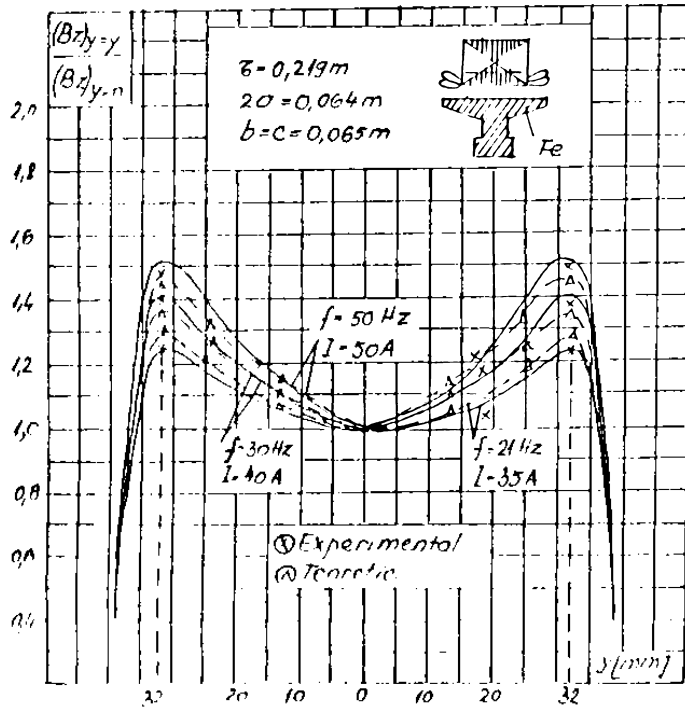


Fig.1.10. Repartiția transversală a inducției magnetice

În [B 24], presupunându-se, pentru o M.L. bilateră, un flux în întrefier perpendicular pe placa-indus și considerând permeabilitatea magnetică a indusului constantă, se găsește că rezistența secundară R_2/s , din schema echivalentă a mașinii asincrone, trebuie multiplicată cu coeficientul K'_2 , dat de efectul transversal:

$$K'_2 = \frac{K_x^2}{K_R} \cdot \frac{(1+s^2 \cdot G^2 \cdot K_R^2 / K_x^2)}{(1+s^2 \cdot G^2)} \quad (1.1)$$

unde

$$K_x = 1 + R_e \left\{ (s \cdot G + j) s \cdot G \cdot \frac{\lambda}{s \cdot \alpha} \cdot \text{th} \alpha a \right\}$$

$$K_R = 1 - R_e \left\{ (1 - j s \cdot G) \frac{\lambda}{s \cdot \alpha} \cdot \text{th} \alpha a \right\}$$

$$\alpha^2 = K^2 (1 + j s \cdot G); K = \sqrt{\mu} / \delta; \gamma = K / \alpha$$

$$\lambda = \frac{1}{1 + \frac{1}{\gamma} \cdot \text{th} \alpha a \cdot \text{th} K(b-a)}$$

$$G = \frac{2 \cdot z^2 \cdot \mu_0 \cdot f}{\tilde{\mu} \cdot \rho \cdot \delta} \quad (\text{factorul de calitate})$$

δ - întrefierul M.L.U. ; ρ - rezistivitatea indusului
 f - frecvența de alimentare; a - semilățimea inductorului.

La M.L. unde produsul $s \cdot G$ este mic, rezultă pentru K'_2 o expresie de forma [P 4]:

$$K_2 = 1 + \frac{z^2}{\tilde{\mu}^2 \cdot (b-a) \cdot s} \quad (1.2)$$

unde: b - semilățimea indusului
 ζ - pasul polar.

Pentru M.L. cu inductorul de lățime egală cu cea a indusului, după [B 18], coeficientul K_2 este:

$$K_2 = \frac{1}{1 - \frac{\text{th}(\tilde{r}/\zeta) \cdot a_e}{(\tilde{r}/\zeta) \cdot a_e}} \quad (1.2')$$

unde $a_e = a + (1 + 2) \delta$.

Inducția la distanța y de centru, raportată la valoarea inducției la $y = 0$, are expresia [B 11]:

$$\frac{(B_z)_{y=y}}{(B_z)_{y=0}} = 1 + \frac{\frac{\alpha^2 - \beta^2}{\alpha \cdot \omega_1 \cdot s} \cdot A \cdot (\text{ch} \beta y - 1)}{\frac{\alpha \cdot G}{\omega_1 \cdot s} + \frac{\alpha^2 - \beta^2}{\alpha \cdot \omega_1 \cdot s} \cdot A \cdot \text{ch} \beta y} \quad (1.3)$$

unde: $\alpha = \tilde{r}/\zeta$; $\omega_1 = 2 \tilde{r} f$; s - alunecarea

$$G = \frac{J_{sm}}{j \frac{\alpha^2}{\omega_1 \cdot s \cdot \mu_0} \left[\frac{1}{\mu_r \cdot r_1} + \frac{1}{\alpha} (e^{\alpha \delta} - 1) \right] - \frac{r}{r_1}} \quad (1.4)$$

$$\alpha^2 - \beta^2 = \frac{-j \mu_0 \cdot s \cdot \omega_1 \cdot r}{1/\mu_r + (r_2/r_{20}) \cdot (1 - e^{-r_{20} \delta})} \quad (1.5)$$

$$J_{sm} = \frac{2\sqrt{2}}{\tilde{r}} \omega_1 \cdot \frac{(NK_B) \cdot I_1}{2p\zeta} \quad (1.6)$$

$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ (permeabilitatea magnetică a indusului)
 N - numărul de spire pe fază.

$$\gamma_{20}^2 = \alpha^2 - \beta^2 \quad (1.7)$$

$$-\alpha^2 + \beta^2 + \gamma_2^2 = j \cdot \mu \cdot s \cdot \omega_1 \cdot \tau \quad (1.8)$$

$$-\alpha^2 + \gamma_1^2 = j \mu s \cdot \omega_1 \cdot \tau \quad (1.9)$$

$$A = \frac{(2n-1) \cdot m}{2 \omega_1 \cdot \tau} \quad (1.10)$$

$$m = -\frac{\omega_1^2}{(\mu \tau^2)} + \sqrt{\left(\frac{\omega_1^2}{(\mu \tau^2)}\right)^2 + \frac{4n(n-1) \cdot \omega_1^2 \cdot \tau^2}{2 \cdot (n-1)^2}} \quad (1.11)$$

n, K - coeficienți ce aproximează curba de magnetizare prin relația: $B = K \cdot H^{1-2/n}$.

O evaluare globală a efectului transversal se face în lucrarea [B 6].

I.2.2. Efectul longitudinal.

Datorită lungimii finite în direcția de mișcare, la M.L. apare efectul longitudinal, separat în [B 15] în două sub-efecte:

- static, determinat de caracterul deschis al circuitului magnetic la capete, în absența indușului;
- dinamic, determinat de intrarea și ieșirea succesivă a indușului de sub inductor, având ca urmare trecerea dintr-o zonă fără câmp magnetic, într-o zonă cu câmp magnetic. Se induc tensiuni și se stabilesc, astfel, curenți de reacție suplimentari, însoțiți de pierderi suplimentare [P 2].

S-a arătat în [W 7, W 8] influența dăunătoare a acestui fenomen, mai ales la viteze mari.

În mai toate lucrările se consideră că există câmp magnetic doar în zona întrefierului, zonă definită prin proiecția ortogonală a inductorului pe planul indușului; în realitate există câmp magnetic ale cărui linii se închid și în exteriorul întrefierului, câmp de dispersie, care determină inegalitatea inductivităților fazelor mașinii și deci curenți primari asimetrice, la o alimentare cu tensiuni simetrice.

În [P 2] se admite că permeanța tuburilor elementare de câmp din zonele de capăt are valoarea jumătate din permeanța tuburilor de câmp din zona întrefierului uniform. În calcule, la lungimea reală a mașinii se mai adaugă lungimea echivalentă a capetelor.

Un studiu al câmpului magnetic în zonele de capăt, pentru diferite forme ale inductorului la capete, este dată în [B 10].

La o alimentare cu curenți simetrici și la neglijarea armonicilor de dinți și cele^{o/e} solenației, inducția magnetică din întrefier, în prezența indusului, are expresia aproximativă [B 15]:

$$B(x,t) = B_m \cdot \cos(\omega_1 \cdot t - (\tilde{\omega}/\zeta)X) - B_m \cdot e^{-xT/V} \cdot \cos(\omega_1 \cdot t - \frac{\tilde{\omega}X}{\zeta(1-s)})$$

(1-12)

unde: V - viteza indusului

T - constanta de timp a ansamblului
indus-întrefier.

Se poate observa că termenul $(\omega_1 t - \frac{\tilde{\omega}X}{\zeta(1-s)}) = 0$ pentru $X = vt$, ceea ce înseamnă că această componentă a câmpului magnetic este fixă față de indus și amplitudinea ei scade cu mărirea distanței față de capătul de intrare, înglobând în ea efectul longitudinal dinamic. Cum se poate observa ușor, influența efectului longitudinal dinamic crește cu pasul polar și cu viteza indusului, la viteze mari putându-se diminua prin: - înfășurări de amortizare [Y 3];

- ocuparea incompletă sau lăsarea liberă a anumitor ancoșe [O2];
- forma tolelor la capetele de intrare și ieșire [W8];

I.2.3. Forțe suplimentare.

Forța rezultantă dezvoltată de M.L., în general, are 3 componente;

- forța longitudinală (de tracțiune) - componenta după direcția de mișcare;

- forța transversală - componenta din planul indusului, după direcția perpendiculară pe direcția de mișcare;
- forța normală - componenta după axa OZ perpendiculară pe indus.

Ultimele două sînt forțe suplimentare specifice M.L. în general și M.L. unilaterale în special.

Forța transversală este cauzată de plasarea asimetrică, în direcție transversală a indusului.

Are 3 componente.

- F_y Al / forțe transversale determinate de
- F_y Fe / curenți induși în aluminiu, respectiv fier, și au tendință de a mări deplasarea indusului față de inductor.
- $F_y a$ - forța transversală de readucere care tinde să restabilească poziția de reluctanță magnetică minimă.

Valoarea forței transversale este dată de integrala:

$$F_y = \frac{1}{2} R_0 \left[\int_B \frac{B_z}{\mu_0} \cdot \underline{I}_x \cdot ds \right] \quad (1.13)$$

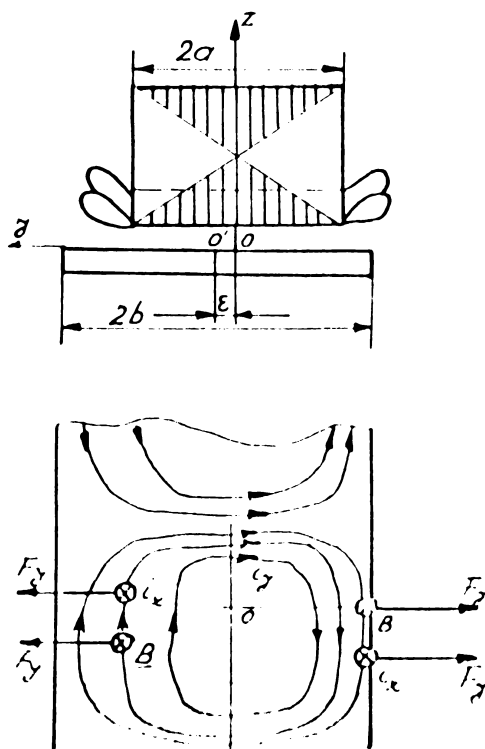


Fig.1.11. Forța transversală.

ϵ - deplasarea indusului față de inductor.

sau :

$$F_y = \left. \frac{\partial W}{\partial \varepsilon} \right|_{\phi = ct} \quad (1.14)$$

unde: W - energia magnetică a maginii
S - suprafața indusului.

Tendința forței transversale este de a mări dezechilibrul pentru $\varepsilon < \varepsilon_{\max}$, schimbându-și sensul pentru $\varepsilon \geq \varepsilon_{\max}$, ca urmare a preponderenței fierului masiv (componenta $F_{y a}$) care tinde să restabilească poziția de reluctanță magnetică minimă. (fig. 1.12).

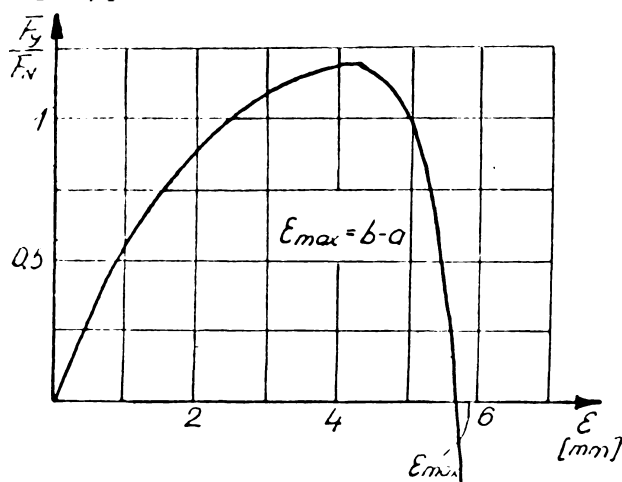


Fig.1.12. Variația forței transversale cu mărirea dezechilibrului.

F_N - forța nominală de propulsie.

Forța normală la M.L.U. are 3 componente:

- $F_z Al$
 - $F_z Fe$
 - $F_z a$
- } forțele de levitație date de curenții din placa de aluminiu, respectiv fier;
- forța de atracție între miezul primarului și fierul masiv;

In absența aluminiului, condiția de autolevitație a fierului masiv al indusului este:

$$F_z Fe > F_z a \quad (1.15)$$

ceea ce în final conduce la inegalitatea [B 12] (fig.1.13)

$$\frac{\omega \cdot s \cdot \tilde{r}}{2\alpha^2} \cdot \mu_0 \cdot \sqrt{n} > 1 \quad (1.16)$$

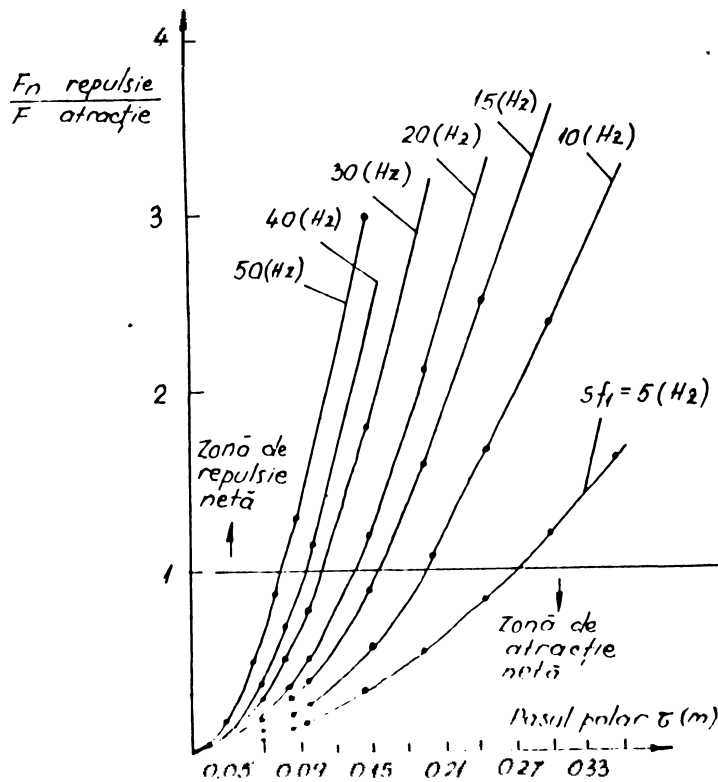


Fig. 1.13. Condiția de autolevitație a fierului masiv.
[B 12, p 30]

În fig. 1.14 se dau componentele forței normale pentru cazul în care inductorul este din aluminiu pe fier masiv.

Pentru o mașină de acest tip s-a obținut pentru forța longitudinală totală 18500 N, iar pentru cea normală repulsivă 30000 N.

În cazul unei M.L. cu datele:

$\zeta = 0.35$ m; $2p = 10$ poli; $2a = 0,2$ m; $d_{Al} = 0.006$ m; $\delta = 0.01$ m; $K = 0,535$; $n = 2,33$ [B 12, p 35], s-au obținut caracteristicile forței normale date în fig. 1.14.

Forța de levitație avînd o caracteristică prea cîștitoare nu poate realiza singură susținerea vehiculului echipat cu M.L.U. și pentru a limita pătura de curent primară la valori admisibile din punctul de vedere al încălzirii (la o inducție în întrefier constantă), este necesar ca frecvența secundară să nu depășească 20 Hz ($s.f_1 = 20$ Hz) [B 12].

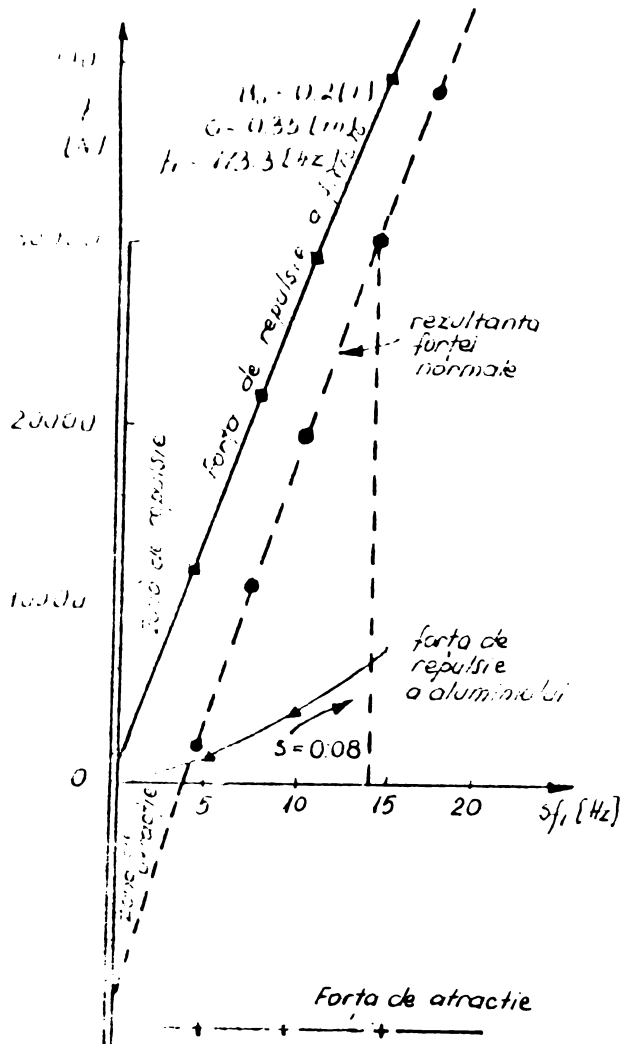


Fig.1.14. Componentele forței normale.

B_0 - inducția din întrefier; $s_2 = s \cdot f_1$ - frecvența secundară.

1.3. Metode de calcul.

La calculul performanțelor M.L. se folosesc ca modele matematice de calcul:

- modele unidimensionale
- modele bidimensionale
- modele tridimensionale.

Cu aceste modele se poate obține o rezolvare analitică sau numerică a ecuațiilor lui Maxwell.

1.3.1. La modelele unidimensionale se ia în considerare efectul pelicular, considerînd o variație sinusoidală a cîmpului magnetic, în direcția longitudinală (nu țîn seama de efectul longitudinal).

În raport cu considerarea neliniarității curbei de magnetizare a materialului feromagnetic masiv al indusului, distingem următoarele moduri de abordare:

- a) Folosirea în calcule a permeabilității magnetice complexe a indusului [N 8]:

$$\underline{\mu} = \frac{\underline{B}}{\underline{H}} = \mu_0 \cdot e^{-j\psi} \quad (1.17)$$

unde - \underline{B} și \underline{H} sînt inducția magnetică, respectiv cîmpul magnetic, în formă complexă, iar ψ are expresia:

$$\psi = \arcsin \left(\mu_0 \cdot W / (\tilde{\mu}_0 \cdot B_m^2) \right) \quad (1.18)$$

W - fiind pierderile prin istereză raportate la unitatea de volum, iar B_m - valoarea maximă a inducției magnetice.

Relația (1.17) a fost dedusă considerînd bucla de istereză ca fiind o elipsă cu aceeași arie și bucla reală (aceleași pierderi).

Pierderile prin istereză, considerate prin permeabilitatea magnetică complexă, $\underline{\mu}$, influențează factorul de putere al indusului mărindu-i valoarea.

- b) Aproximarea curbei de magnetizare prin parabolă [B 12]

$$B = K \cdot H^{1-2/n} \quad (1.19)$$

unde: K , n - coeficienți determinați din curba de magnetizare ridicată experimental.

În acest caz, potențialul magnetic vector se obține [B 12] sub forma:

$$\underline{A}_y 1 = (\underline{A}_0 \cdot e^{-\alpha z} + \underline{B}_0 \cdot e^{\alpha z}) \cdot e^{j(\omega t - \alpha x)} - \text{pentru întrefier} \quad (1.20)$$

și

$$\underline{A}_y 2 = (\underline{A}_1 \cdot e^{-\gamma(z-\delta)} + \underline{B}_1 \cdot e^{-\gamma(z-\delta)}) \cdot e^{j(\omega t - \alpha x)} - \text{pentru placa din aluminiu a indusului} \quad (1.21)$$

Pentru fierul masiv, câmpul magnetic este dat de expresia:

$$\underline{H}_{xi} = \left[H_0^{1/n} + a_1 \cdot (d + \delta - z) \right]^n \cdot e^{j\beta} \cdot e^{j(\omega t - \alpha x)} \quad (1.22)$$

unde:

$$\beta = \sqrt{n(n-1)} \cdot \ln \left[\frac{1}{a_1} \cdot (H_0^{1/n} + a_1 (\delta + d - z)) \right] \quad (1.23)$$

$$a_1 = \sqrt{\frac{\omega \cdot s \cdot K \cdot \tilde{\nu}_{Fe}}{(2n-1) \sqrt{n(n-1)}}} \quad (1.24)$$

$$\gamma^2 = \alpha^2 + j \omega \cdot s \cdot \mu_0 \cdot \tilde{\nu}_{Al} ; \alpha = \tilde{\pi} / \tau$$

δ - întrefierul maginii

d - grosimea plăcii de aluminiu.

Constantele \underline{A}_0 , \underline{B}_0 , \underline{A}_1 , \underline{B}_1 se deduc din condițiile de continuitate pentru componentele *tangțiale* ale intensității câmpului magnetic, respectiv pentru componentele normale ale inducției magnetice, la suprafețele de discontinuitate. Expresiile lor sînt date în [B 12].

Cu expresiile de mai sus se poate calcula câmpul în toate zonele motorului și apoi curenții induși, forțele longitudinale, normale, precum și celelalte mărimi care determină funcționarea maginii în diferitele situații.

În acest mod în [B 12] s-au găsit pentru M.L. unilaterale condițiile de autolevitație, calculînd forțele de atracție și cele repulsive.

I.3.2. Modelele bidimensionale,

pot fi - analitice;

- numerice.

Pe baza acestor modele se consideră efectul pelicular și se ține seama fie de efectul transversal, fie de cel longitudinal.

Considerarea efectului transversal și a saturației magnetice a indusului, printr-un model bidimensional analitic, se prezintă în capitolul V.

Metodele numerice, spre deosebire de metodele analitice, au la bază un model matematic mai apropiat de realitate, obținându-se rezultate bune, dar timpul de calcul pe calculator este relativ mare.

Se folosesc, în prezent, două variante de calcul:

- a) metoda diferențelor finite [H 2];
- b) metoda elementelor finite [F 3];

Metoda diferențelor finite are la bază înlocuirea derivatelor parțiale prin diferențe:

$$\frac{\partial B}{\partial X} = \frac{1}{2h} (B_{i+1,j} - B_{i-1,j}) - \text{derivata parțială de ordinul 1 a cîmpului după axa } OX. \quad (1.25)$$

$$\frac{\partial^2 B}{\partial X^2} = \frac{1}{p^2} (B_{i-1,j} - 2B_{i,j} + B_{i+1,j}) - \text{derivata parțială de ordinul 2 a cîmpului după axa } OX. \quad (1.26)$$

Molecula de calcul care s-a folosit este dată în fig. 1.15 a.

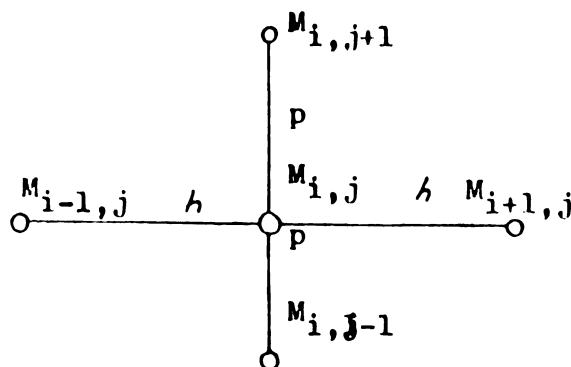


Fig. 1.15.a.

Se pot folosi diferite molecule de calcul mai simple sau mai complicate, forma lor influențând precizia, convergența calculului și deci timpul de lucru.

În [H 2] se rezolvă numeric ecuația obținută pentru potențialul magnetic vector:

$$\nabla^2 \underline{A} = \mu \cdot \nabla \left[\frac{\partial \underline{A}}{\partial t} - \underline{v} \cdot \text{rot } \underline{A} \right] \quad (1.27)$$

folosind expresiile:

$$\underline{A}(i,j) = \frac{1}{4} \left[\underline{A}(i+1,j) + \underline{A}(i-1,j) + \underline{A}(i,j+1) + \underline{A}(i,j-1) \right] \quad (1.28)$$

- pentru intrefier și

$$\underline{A}(i,j) = \frac{1}{\underline{Y}} \left[\underline{A}(i+1,j) + \underline{A}(i-1,j) + \alpha \cdot \underline{A}(i,j+1) + \beta \cdot \underline{A}(i,j-1) \right] \quad (1.29)$$

- pentru indus.

unde:

$$\alpha = 1 - 1/2 \cdot \mu \cdot \tilde{V} \cdot V \cdot h$$

$$\beta = 1 + 1/2 \cdot \tilde{V} \cdot \mu \cdot V \cdot h$$

$$\underline{Y} = 4 + j \omega \cdot \mu \cdot V \cdot h^2$$

h = p (pasul de iterație)

V = viteza indusului față de inductor.

La calculul derivatelor s-a folosit molecula de calcul prezentată mai sus.

Forța longitudinală, discretă în nodul (i,j) este:

$$F_x(i,j) = \operatorname{Re} \left[j \cdot 0,5 \cdot \omega \cdot \tilde{V} \cdot \underline{A}(i,j) \cdot \underline{B}_z^*(i,j) - 0,5 \cdot \tilde{V} \cdot V \cdot \underline{B}_z(i,j) \cdot \underline{B}_z^*(i,j) \right] \quad (1.30)$$

unde:

$$\underline{B}_z(i,j) = \frac{1}{2h} \left[\underline{A}(i,j+1) - \underline{A}(i,j-1) \right] \quad \begin{array}{l} \text{- câmpul magnetic} \\ \text{în nodul (i,j) după} \\ \text{axa Oz} \end{array} \quad (1.31)$$

Pierderile de putere în nodul (i,j) sînt:

$$P(i,j) = \operatorname{Re} \left[0,5 \cdot \underline{J}(i,j) \cdot \underline{J}^*(i,j) / \tilde{V} \right] \quad (1.32)$$

densitatea de curent fiind:

$$\underline{J}(i,j) = -j \cdot \omega \cdot \tilde{V} \cdot \underline{A}(i,j) + \frac{\tilde{V} \cdot V}{2h} \left[\underline{A}(i,j+1) - \underline{A}(i,j-1) \right] \quad (1.33)$$

Puterea ce trece în întrefier se poate calcula folosind vectorul lui Poynting și se obține pentru nodul (i,j), expresia:

$$P_{(i,j)} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[-j \omega \cdot \underline{A}_{(i,j)} \cdot \underline{B}_{x(i,j)}^* / \mu \right] \quad (1.34)$$

cu

$$\underline{B}_{x(i,j)} = -\frac{1}{2h} \left[\underline{A}_{(i+1,j)} - \underline{A}_{(i-1,j)} \right] - \text{cîmpul magnetic în nodul (i,j) după axa OX.} \quad (1.35)$$

La un astfel de model de calcul se utilizează în jur de 2000 noduri, convergența avînd la bază aproximativ 250 de iterații ceea ce duce la un timp de calcul pe ordinator în jurul a 5'.

Pe baza celor de mai sus în [11 2], s-a găsit caracteristica mecanică a mașinii, care s-a comparat cu a unei mașini ideale, fără efect longitudinal (fig.1.15.b).

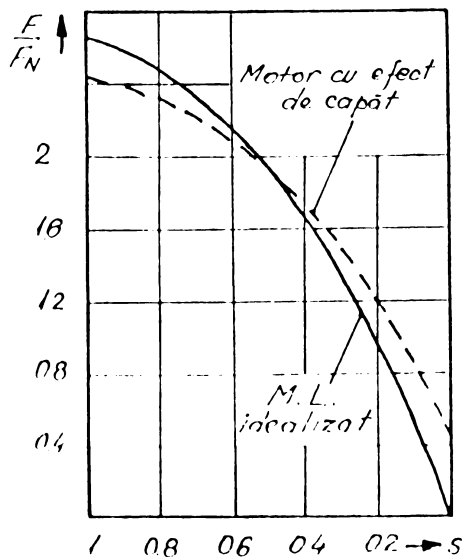


Fig. 1.15.b. Caracteristica forței de tracțiune.

— fără efect longitudinal
 -- cu efect longitudinal calculat printr-o metodă numerică.

În [1 3] se dă principiul de calcul pentru aflarea inducției magnetice la suprafața indusului pentru o permeabilitate magnetică constantă.

La calculul inducției magnetice s-a folosit metoda suprarelaxării, iar pentru calculul curentului cea a subrelaxării (coeficientul de suprarelaxare $\beta_1 = 1.8$, iar cel de subrelaxare $\beta_2 = 0.1$). Indusul s-a considerat dintr-un material nemagnetic,

conductor și izotrop.

Rezultatele sînt date în fig. 1.16.

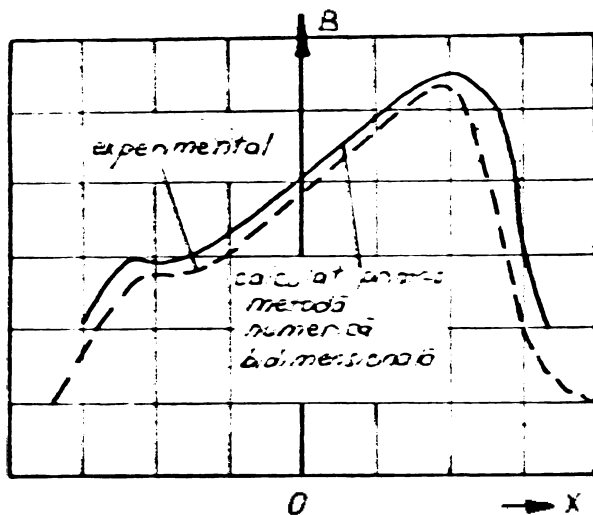


Fig.1.16. Repartiția inducției pe lungimea M.L.

— experimental
 — calculat numeric
 [13]

Metoda elementelor finite folosește tehnica proiectivă Galerkin, care constă, în principiu, în aproximarea funcției printr-o combinație liniară de funcții elementare [F 3], obținându-se, în final, un sistem de ecuații algebrice liniare.

De exemplu, în elementul h , din fig.1.17, potențialul magnetic vector \underline{A} este reprezentat prin:

$$\underline{A}_h = \sum_{j=1}^3 L_j(x,y) \cdot \underline{A}_j \quad (1.36)$$

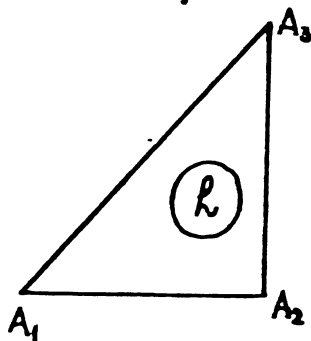


Fig. 1.17. Rețeaua triunghiulară de aproximare.

Calculul se continuă pe cale matricială, ajungându-se în final la un program de calcul a cărui ordinogramă principală este următoarea [F 3]:

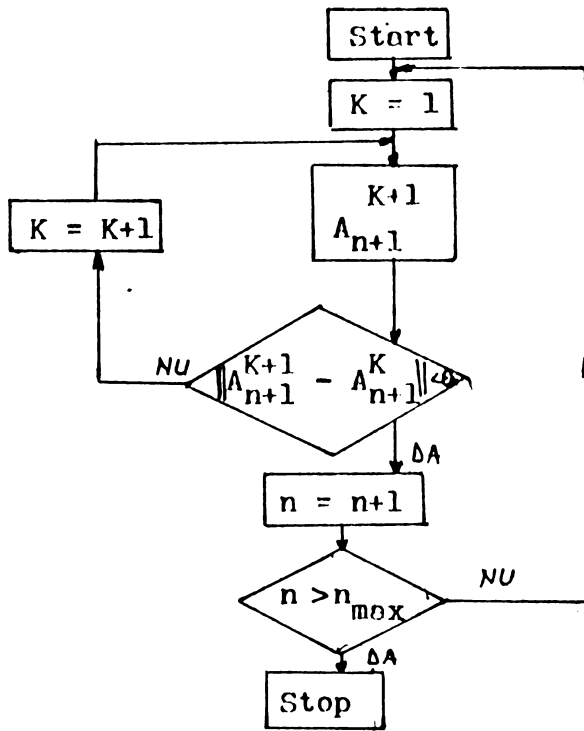


Fig.1.18. Ordinograma de calcul.

1.3.3. Modelele tridimensionale iau în considerare efectul transversal, cel longitudinal și cel de refulare și se bazează pe:

- modelarea cu ajutorul legilor similitudinii. Probleme deosebite apar la realizarea practică a modelului (de exemplu la un raport al dimensiunilor geometrice de 1/10 este necesar un raport al rezistivităților de 1/100, ceea ce e greu de obținut practic) [M2].

- folosirea seriilor duble Fourier. În [W7] s-a propus un asemenea model, efectuând un calcul creșterii cu creșterii pentru o M.L. bilaterală cu inductiv din aluminiu ($\ln \mu = \mu_0 = ct$), ceea ce a permis rezolvarea relativ ușor a ecuațiilor de cîmp. Componenta normală a inducției datorită creșterii de ordinul K este:

$$B_{zK} = B_K \cdot e^{j\psi_K} \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_{nK} \cdot e^{j(\omega t - \frac{x}{G} n \eta)} \cdot \sum_{m=-\infty}^{\infty} C_m \cdot e^{j\lambda_m y} \quad (1.37)$$

unde:

- B_K - valoarea de vîrf a inducției creștăturii K ;
- φ_K - unghiul de defazaj al curentului ce trece prin conductoarele creștăturii K ;
- C_{nK} - coeficientul seriei Fourier după axa OX;
- C_m - coeficientul seriei Fourier după axa OY;
- $A_m = \frac{m}{h_r} (h_r - \text{înălțimea indusului})$;

Inducția rezultantă este obținută prin însumarea contribuției fiecărei creștături. Dacă M.L. are N_c creștături, se obține:

$$\underline{B}_z = \sum_{k=1}^{N_c} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} B_K \cdot C_{nK} \cdot C_m \cdot e^{j(\lambda_m + \frac{x}{\delta} n + \omega t + \varphi_K)} \quad (1.38)$$

Ecuatia (1.38) dă repartiția inducției în întrefier sub forma ei cea mai generală. În raport cu valorile coeficienților, inducția rezultantă poate fi pulsatorie, alunecătoare, sau combinat. Calculul are la bază cunoașterea curentului din creștătură și dacă se impune tensiunea la borne, atunci trebuie utilizată matricea de impedanță a ansamblului inductor-întrefier-indus.

În [01] se calculează M.L. bilaterală prin descompunerea solenației primare în serii Fourier atât după lungimea cât și după lățimea mașinii.

În concluzie, modelele unidimensionale iau în considerare efectul pelicular, dar presupun o variație sinusoidală în direcția longitudinală a mărimilor electromagnetice, neglijând efectul longitudinal și cel transversal. Saturația indusului se consideră printr-o permeabilitate magnetică echivalentă sau prin aproximarea curbei de magnetizare.

Modelele bidimensionale (analitice sau numerice) țin seama de efectul pelicular și de unul din efectele: transversal sau longitudinal.

Metodele de calcul bazate pe modelele uni-bidimensionale se folosesc la alunecări mari (unde efectul longitudinal este redus) și la un grad de saturație al indusului nu prea ridicat.

Modelele tridimensionale bazate pe seriile duble Fourier sînt propuse, în forma existentă în literatură, numai la M.L. cu indusul din material conductor și cu $\mu = \mu_0 = \text{constant}$, avînd la bază principiul superpoziției valabil numai pentru medii liniare.

Prin urmare, metodele de calcul prezentate iau în considerare numai anumite fenomene ce apar la M.L.U. cu indusul dintr-o placă conductoare pe fier masiv și deci nu sînt aplicabile la M.L.U.

Metoda straturilor, prezentată în cap II, utilizează seriile duble Fourier și se bazează pe curba de magnetizare a materialului indusului. Metoda este specifică M.L.U. și generalizează teoria M.L. Cazurile analizate sînt general valabile, oricare ar fi plasarea indusului față de inductor și pentru orice placă din material conductor pe fier masiv. Folosind metoda straturilor se face un calcul optimal al M.L.U. și calculul frînei liniare.

Metodele simplificate de calcul, pentru M.L.U. prezentate în cap.V, neglijează efectul longitudinal și astfel relațiile obținute sînt mai simple și ușor manevrabile. Domeniul de aplicare: - la M.L. cu indus din aluminiu pe fier sau numai fier masiv, la un număr de perechi de poli $p > 2$ și la alunecări $\alpha > 0.2$. În una din metodele date, pentru prima dată în teoria M.L., se caută a se evalua istereza printr-o rezolvare originală a ecuațiilor de cîmp.

Metoda grafo-analitică de la § 5.2, în baza unor diagrame general valabile, face posibilă calcularea, fără mijloace automate de calcul, a performanțelor M.L.U. într-un mod foarte rapid și cu o precizie acceptabilă. Relațiile deduse se pot folosi la proiectarea și optimizarea M.L.U. și la calculul performanțelor M.L. existente.

Metodele de calcul tratate în capitolele următoare sînt aplicabile la M.L.U. și se pot folosi și la M.L. bilaterale, prin particularizarea relațiilor.

INSTITUTUL POLITEHNIC
TIMIȘOARA
BIBLIOTECA CENTRALĂ

Cap. II.

METODA STRATURILOR UTILIZIND SERII DUBLE FOURIER

II.1. Principiul metodei; modelul matematic; factorul de calitate

Metoda de analiză se bazează pe o împărțire fictivă a inducției în straturi, fiecare strat caracterizându-se printr-o permeabilitate magnetică constantă.

Valoarea permeabilității se poate determina cu ordinatorul electronic printr-un calcul iterativ de subrelaxare, care are la bază curba de magnetizare reală dată tabelar în memoria ordinatorului.

Solenajia primară se descompune în serii duble Fourier [01], atât după lungimea mașinii, cât și după lățime, oferind posibilitatea luării în considerare atât a efectului longitudinal cât și a celui transversal.

Modelul de calcul are la bază sistemul de coordonate dat în fig. 2.1.

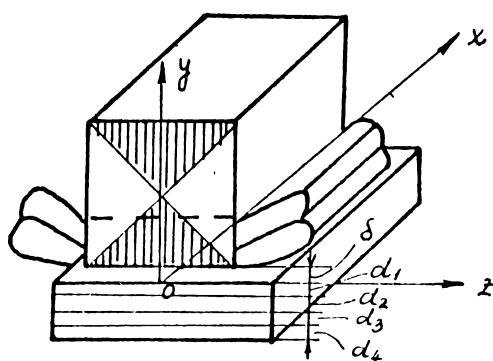


Fig.2.1. Sistemul de coordonate

d_1 -adncimea stratului 1 cu $\mu = \mu_1$

d_i -adncimea stratului i cu $\mu = \mu_i$

În planul YOZ modelul matematic este arătat în fig. 2.2.

Efectul transversal este luat în considerare prin descompunerea solenajiei primare, θ , în serie Fourier de semiperioadă L (fig.2.2).

Se ține seama de câmpul magnetic dat de capetele de bobină, considerându-se pe distanța h o scădere a câmpului după o lege sinusoidală.

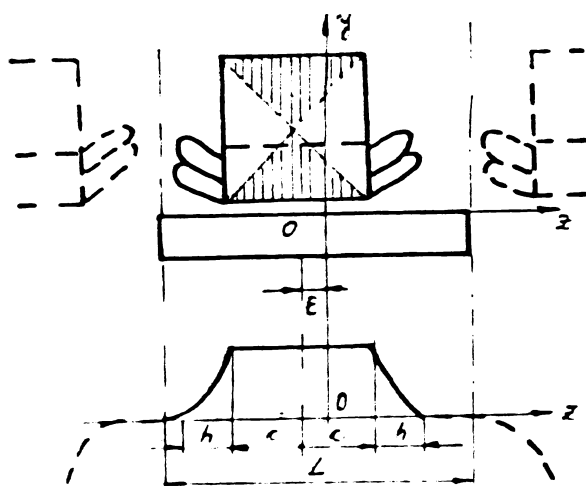


Fig.2.2. Modelul matematic in planul YOZ.

- 2c - lățimea inductorului.
- L - lățimea indusului.
- h - lungimea capetelor de bobină.
- ε - descentrarea indusului față de inductor.

In planul XOY, modelul matematic este reprezentat in fig.2.3.

Se consideră o succesiune infinită de inductoare, avind între ele distanța L_L , necesară ca procesele să poată fi considerate periodice, de semiperioadă $l = L_L + L_S$.

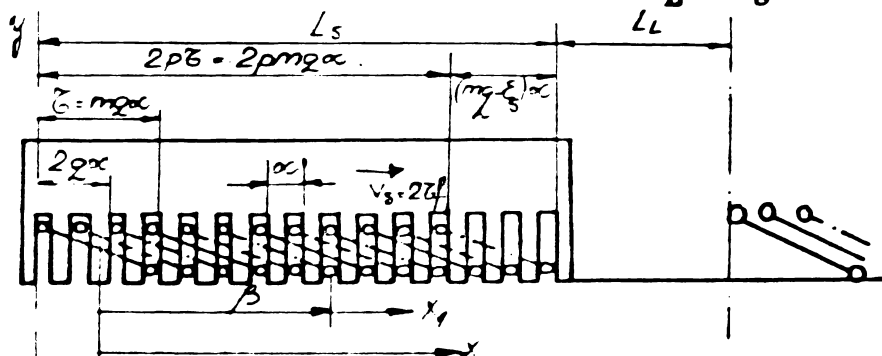


Fig.2.3. Modelul matematic in planul XOY.

Alegerea distanței L_L se face avind in vedere factorul de calitate al mașinii, definit ca și o măsură a posibilității transformării energiei electrice in energie mecanică de către M.L. [L1].

La M.L. bilaterală cu indus nemagnetic, factorul de calitate, G, este [L1]

$$G = \frac{X_m}{R_2} \quad (2.1)$$

unde X_m - reactanța de magnetizare.

R_2 - rezistența secundară.

In cazul M.L.U. se caută echivalarea cu o M.L. bilaterală cu indus nemagnetic avind in vedere puterea electro-

magnetică din întrefier (fig.2.4).

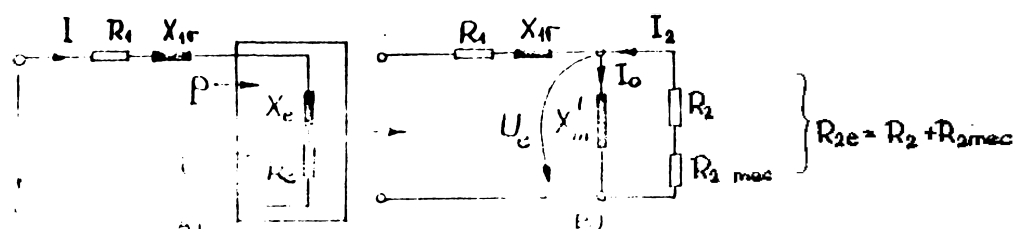


Fig.2.4. Transformarea M.L.U. într-o bilaterală echivalentă.

Schema A este o M.L.U., iar schema B este pentru M.L. bilaterală echivalentă ce are aceeași putere electromagnetică în întrefier, ca și M.L.U. dată.

Pe baza bilanșului puterilor se poate scrie:

$$P = P_{a1} + P_{mec} = 3 \cdot R_{2e} \cdot I_2^2 = 3 \cdot U_e \cdot I_2 - \text{puterea activă} \quad (2.2)$$

$$Q = 3 \cdot X_m' \cdot I_0^2 = 3 \cdot U_e \cdot I_0 - \text{puterea reactivă} \quad (2.3)$$

unde:

P_{a1} - pierderile de putere activă din indusul M.L.U.

P_{mec} - puterea mecanică dezvoltată de M.L.U.

R_2 - rezistența ce determină pierderile de putere din indus

R_{2mec} - rezistența echivalentă puterii mecanice

X_m' - reactanța de magnetizare echivalentă.

Pe baza relațiilor (2.2), (2.3) se poate scrie:

$$R_2 = \frac{P_{a1}}{3 \cdot I_2^2} \quad (2.4)$$

$$X_m' = \frac{U_e}{I_0} \quad (2.5)$$

și astfel factorul de calitate pentru M.L.U. este:

$$G = \frac{X_m'}{R_2} = \frac{U_e}{I_0} \cdot \frac{3I_2^2}{P_{a1}} \quad (2.6)$$

În fig.2.5 se reprezintă factorul de calitate pentru două M.L.U. cu o placă de aluminiu în indus de 6 mm, la pași polari: $\zeta = 0.25$ m și respectiv $\zeta = 0.35$ m.

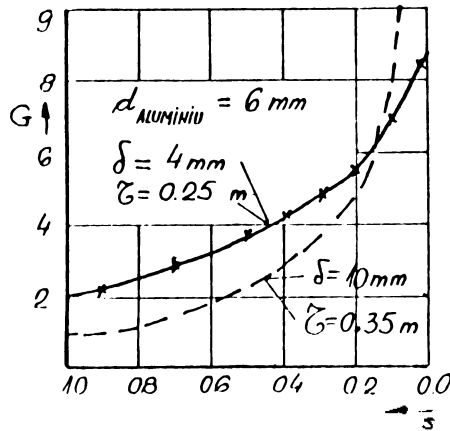


Fig.2.5. Variația factorului de calitate la un indus aluminiu pe fier masiv.

Se observă scăderea factorului de calitate cu creșterea alunecării, situație ușor explicabilă având în vedere efectul pelicular și cel de saturație.

Modificarea factorului de calitate cu variația magnitudinii, în limitele unei încălziri admisibile pentru densitatea de curent, este neînsemnată. (fig.2.6).

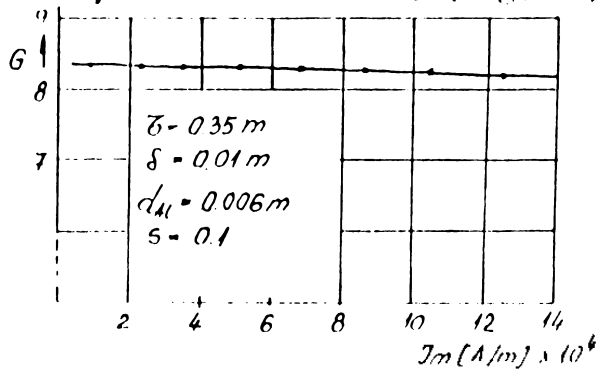


Fig.2.6. Modificarea factorului de calitate la variația păturii de curent.

Factorul de calitate real, G_R , este calculabil din G prin corectarea lui cu niște coeficienți dați în [B21].

Lungimea dintre inductoare (L_L), se calculează pe baza factorului de calitate și folosind rezultatele din [B21, p 130]:

$$L_L = \frac{4}{\sqrt{2}} \quad (2.7)$$

unde:

$$\sqrt{2} = \frac{a_1}{2} \cdot \left(\sqrt{\frac{b_1 + 1}{2}} - 1 \right) \cdot \frac{\omega}{\zeta}$$

$$a_1 = G_r (1 - s)$$

$$b_1 = \sqrt{1 + \left(\frac{4}{G_r(1-s)}\right)^2}$$

Condiția necesară și suficientă este ca L_L să fie o distanță mai mare, sau cel puțin egală cu cea pînă la care procesele electromagnetice din indus se sting.

Variația lungimii L_L cu alunecarea, la diferiți factori de calitate, este dată în fig.2.7.

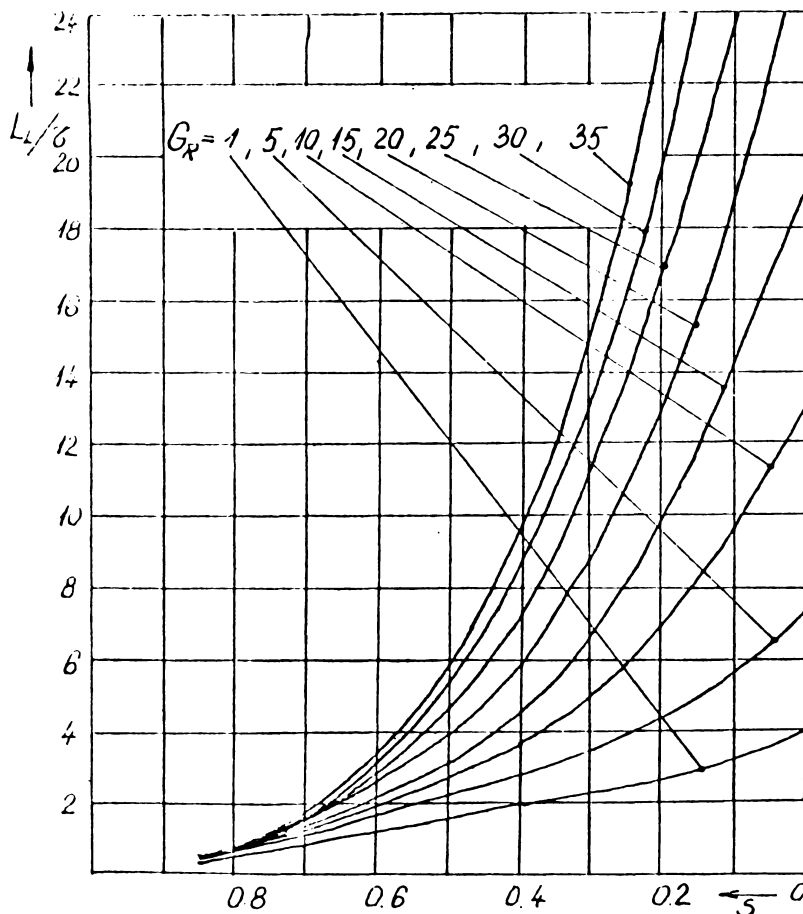


Fig.2.7. Variația lungimii L_L cu alunecarea G_r - factorul de calitate real.

În fig. 2.8. se dă variația lungimii L_L cu factorul de calitate real al M.L., pentru două alunecări: $s = 0.1$ și $s = 0.3$.

M.L. cu un factor de calitate ridicat are o lungime dintre inductoare mai mare și aceasta crește cu scăderea alunecării, deci cu mărirea vitezei indusului.

La factori de calitate mai mari decât zece, variația este liniară.

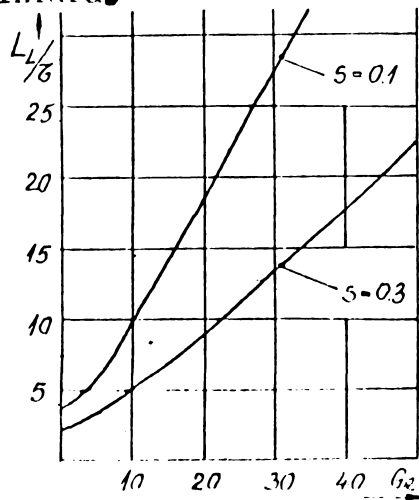


Fig.2.8. Variația lungimii L_L cu factorul de calitate. S - alunecarea ($s = \frac{V_B - V}{V_B}$)

Cazul motorului rotativ (deci efect longitudinal nul) se obține pentru L_L negativ:

$$L_L = \frac{m_q - \xi_B}{2 \tilde{n}} \alpha \cdot l \quad (2.8)$$

unde α, m, q, ξ_B sînt măriri definite în paragraful următor.

II.2. Armonicile solenției primare.

Se admite că alimentarea mașinii se face de la un sistem simetric de curenți, ceea ce presupune tensiuni asimetrice la borne.

În realitate situația este inversă: la bornele mașinii tensiunile de alimentare formează un sistem simetric și rezultă prin înfășurări curenți asimetrice. Nesimetria lor este totuși redusă: $\pm 2\%$ la M.L. cu $2p \geq 12$ și, prin urmare, se poate neglija.

Distribuția de-a lungul axei OX:

Considerînd o înfășurare cu creștăturile marginale semibobinate, cu m faze, q creștături pe pol și fază, p perechi de poli, bobinele avînd deschiderea $(mq - \xi_B)\alpha$, ξ_B fiind scurturea, pentru pasul de creștătură, α , (fig. 2.3), exprimat în radiani, se obține [03]:

$$\alpha = \frac{L_B}{L_B + L_L} \cdot \frac{\tilde{n}}{mq(2p+1) - \xi_B} \quad (2.9)$$

- la o infășurare concentrată, și

$$\alpha = \frac{L_B}{L_B + L_L} \cdot \frac{2 \tilde{H}}{m \cdot q(2p + 1) + 2q - \mathcal{E}_B} \quad (2.10).$$

la o infășurare distribuită.

Curentul prin faza "K", în scriere complexă, are următoarea formă:

$$\underline{I}_{1,K} = I_1 \cdot \sqrt{2} \cdot e^{j(\omega t - (K-1)2\tilde{H}/m)} \quad (2.11)$$

I_1 - valoarea efectivă a curentului,

$\omega = 2\tilde{H}f$ - pulsația unghiulară.

Armonica de ordinul ν a solenației bobinei 1 din primul grup de bobine ale fazei 1 este:

$$\underline{\theta}_\nu = \frac{N \cdot I_1 \sqrt{2}}{\tilde{H} \cdot \nu} \cdot \sin \nu (mq - \mathcal{E}_B) \alpha / 2 \cdot e^{j(\omega t - \nu x)} \quad (2.12)$$

unde:

N - numărul de spire ale unei bobine.

Pentru expresia solenației produse de curenții din bobina x a grupului "q" de bobine ale fazei "K" și polului " ρ ", se obține:

$$\underline{\theta}_\nu(x, \rho', K) = \frac{N I_1 \sqrt{2}}{\tilde{H} \nu} \sin \nu (mq - \mathcal{E}_B) \alpha / 2 \cdot e^{j(\omega t - \nu x - (K-1)2\tilde{H}/m + \nu(x-1)\alpha + \nu(\rho'-1)m\alpha + \nu(k-1)2q\alpha)} \quad (2.13)$$

Prin însumarea celor "q" bobine ale celor "m" faze distribuite pe cei 2p poli rezultă solenația totală sub forma:

$$\begin{aligned} \underline{\theta}_\nu(x, t) &= \sum_{x=1}^2 \sum_{k=1}^m \sum_{\rho'=1}^{2p} \theta_\nu(x, \rho', k) = \\ &= j 2 \frac{N \cdot I_1 \sqrt{2}}{\tilde{H} \nu} \cdot K_B \cdot e^{j(\omega t - \nu x + \nu \rho + \tilde{H}/m)} \quad (2.14) \end{aligned}$$

unde, pentru simplitate, sau făcut notațiile:

$$\beta = (p-1/2)m\alpha + (m-1)q\alpha + (q-1)\alpha/2 \quad (2.15)$$

$$K_B = \frac{\sin p(\sqrt{m} \cdot q\alpha)}{\sin \sqrt{m} q\alpha} \cdot \frac{\sin q\sqrt{\alpha}/2}{\sin \sqrt{\alpha}/2} \cdot \frac{\sin m(\sqrt{q}\alpha - \tilde{r}/m)}{\sin(\sqrt{q}\alpha - \tilde{r}/m)} \cdot \sin \frac{\sqrt{m} q\alpha}{2} \sin \sqrt{\alpha} \frac{m-1}{2} \quad (2.16)$$

care la M.E. rotative cu pas diametral devine: $K_B = p \cdot q \cdot m$.

Numărul armonicilor după axa OX ale solenației:
 $\gamma_{\max} = (Z_1 + p) \frac{L_0 + L_L}{L_0} \cdot 1,1$ (Z_1 - numărul de creștături)
 depinde de lungimea L_L și crește o dată cu aceasta și prin
 urmare timpul de calcul se mărește și el.

Unghiul β din relația (2.14) poate fi eliminat prin
 schimbarea de variabilă:

$$x_1 = x - \beta \cdot \frac{l}{2\pi} \quad (2.17)$$

obținându-se o nouă origine pentru sistemul de coordonate
 (conform fig.2.3).

Distribuția de-a lungul axei OZ: (cazul general:
 asimetrie laterală).

Presupunând o variație sinusoidală a cîmpului pe
 distanța "h" (fig.2.2), coeficientul de ordinul n din seria
 Fourier de semiperioadă L, pentru termenii în cosinus, se poa-
 te scrie sub forma:

$$K_{T1}^i = \frac{2}{\pi} \left[\int_{-(c+d+\xi)}^{-(c+\xi)} \left(1 + \sin \frac{z+c+\xi}{h} \cdot \frac{\tilde{h}}{2}\right) \cos \frac{n\tilde{h}}{L} z \left(\frac{\tilde{h}}{L} dz\right) + \right. \\ \left. + \int_{-(c+\xi)}^{c-\xi} \cos \frac{n\tilde{h}}{L} \left(\frac{\tilde{h}}{L} dz\right) + \int_{c-\xi}^{c-\xi+h} \left(1 - \sin \frac{z-c+\xi}{h} \cdot \frac{\tilde{h}}{2}\right) \cos \frac{n\tilde{h}}{L} z \left(\frac{\tilde{h}}{L} dz\right) = \right. \\ \left. = \frac{4}{\pi} \frac{\cos\left(\frac{n\tilde{h}\xi}{L}\right)}{\left[\left(\frac{L}{2h}\right)^2 - n^2\right]} \cdot \left[1/n\left(\frac{L}{2h}\right)^2 \cdot \sin \frac{n\tilde{h}}{L}(c+h) - \left(\frac{L}{2h}\right) \cos \frac{n\tilde{h}c}{L}\right] \quad (2.18)$$

iar pentru termenii în sinus este:

$$K_{T_2}^* = \frac{2}{\tilde{h}} \left[\int_{(c+\xi+h)}^{-(c+\xi)} (1 + \sin \frac{z+c+\xi}{h} \cdot \frac{\tilde{h}}{2}) \sin \frac{n\tilde{h}}{L} z \left(\frac{\tilde{h}}{L} dz \right) + \right. \\ \left. \int_{(c-\xi)}^{c-\xi+h} (1 - \sin \frac{z-c+\xi}{h} \cdot \frac{\tilde{h}}{2}) \sin \frac{n\tilde{h}}{L} z \left(\frac{\tilde{h}}{L} dz \right) \right] = \\ = \frac{4}{\tilde{h}} \frac{\sin \left(\frac{n\tilde{h}\xi}{L} \right)}{\left[\left(\frac{L}{2h} \right)^2 - n^2 \right]} \cdot \left[-1/n \left(\frac{L}{2h} \right)^2 \cdot \sin \frac{n\tilde{h}}{L} (c+h) + \left(\frac{L}{2h} \right) \cdot \cos \frac{n\tilde{h}c}{L} \right] \quad (2.19)$$

deci:

$$K_{T_1}^* = \frac{4}{\tilde{h}} K_{T_1} \quad (2.20)$$

$$K_{T_2}^* = \frac{4}{\tilde{h}} K_{T_2} \quad (2.21)$$

Amplitudina de ordinul n a solenoidului primare, după axa OZ , are forma:

$$K_{T_1} = \frac{4}{\tilde{h}} (K_{T_1} \cdot \cos \frac{n\tilde{h}}{L} z + K_{T_2} \cdot \sin \frac{n\tilde{h}}{L} z) ; n = 1, 3, 5 \quad (2.22)$$

Reprezentarea rezultantă a solenoidului primare în formă finală, este următoarea:

$$A(x_1, z, t) = j \cdot B \frac{N \cdot I_1 \sqrt{2}}{\tilde{h}^2} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{K_B}{\nu} (K_{T_1} \cdot \cos \frac{n\tilde{h}}{L} z + K_{T_2} \cdot \sin \frac{n\tilde{h}}{L} z) \cdot e^{j(\omega t - \nu x_1 \cdot 2\tilde{h}/l + \tilde{h}/m)} \quad (2.23)$$

La plasarea simetrică a indusului față de inductor ($\xi = 0$), relațiile (2.18), (2.19) devin:

$$K_{T_1}^* = \frac{4}{\tilde{h}} \cdot \frac{\left(\frac{L}{2h} \right)^2}{\left(\frac{L}{2h} \right)^2 - n^2} \cdot \left[\frac{1}{n} \left(\sin \tilde{h} n \frac{c+h}{L} \right) - \frac{2h}{L} \cos \frac{\tilde{h}nc}{L} \right] \quad (2.24)$$

$$K_{T_2}^* = 0 \quad (2.25)$$

rezultând o distribuție după axa OZ a solenoidului primare, numai cu termeni în cosinus.

II.3. Ecuatiile câmpului electromagnetic.

În scrierea ecuațiilor lui Maxwell se folosește potențialul magnetic vector \underline{A} , în formă complexă.

Ipoteze de calcul:

a) permeabilitatea pachetului de tole ale inductorului se presupune infinită.

b) indusul se divide fictiv (pe adâncime) în mai multe straturi cu permeabilitate magnetică constantă, calculată folosind un procedeu iterativ de subrelaxare.

c) se neglijează componenta E_y ($E_y=0$) a câmpului electric din indus.

Bazându-ne pe ipoteza c), potențialul magnetic vector are numai 2 componente: A_x și A_z (aceasta deoarece $\underline{E} = -\nabla \frac{\partial \underline{A}}{\partial t}$)

Ecuatiile potențialului magnetic vector pentru întrefier: ($0 \leq y \leq \delta$)

$$\Delta \underline{A} = 0 \quad (2.26)$$

$$\text{div } \underline{A} = 0$$

sau

$$\frac{\partial^2 A_{\delta,z}}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 A_{\delta,z}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_{\delta,z}}{\partial z^2} = 0$$

$$\frac{\partial^2 A_{\delta,x_1}}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 A_{\delta,x_1}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_{\delta,x_1}}{\partial z^2} = 0$$

$$\frac{\partial A_{\delta,x_1}}{\partial x^2} + \frac{\partial A_{\delta,z}}{\partial z} = 0$$

pentru stratul "i" al indusului ($\delta + \sum_1^{i-1} d_j \leq y \leq \delta + \sum_1^i d_j$)

$$\Delta \underline{A} = \sigma \cdot \mu_1 \cdot \frac{\partial \underline{A}_i}{\partial t} \quad (2.27)$$

$$\operatorname{div} \underline{A} = 0$$

unde: σ - conductibilitatea electrică a stratului "i"
 μ_1 - permeabilitatea magnetică a stratului "i".

Pentru cele m straturi, în care se consideră divizat inductul, se obțin m ecuații de forma (2.27).

Numărul de straturi, m , influențează precizia rezultatelor, fiind de dorit, din acest punct de vedere, un număr cât mai mare; pe de altă parte timpul de calcul crește mult cu mărirea lui m , propunându-se, în cazul de față, un număr de 4 straturi.

Pe baza relației (2.23), soluțiile ecuațiilor de forma (2.26) se pun, prin metoda separării variabelor, sub forma:

$$\underline{A}_{\delta, z} = \sum_{\gamma} \sum_{n}^{\infty} \underline{C}_0 \cdot (\operatorname{ch} \lambda_0 y + \underline{C}_0^* \cdot \operatorname{sh} \lambda_0 y) \cdot (K_{T_1} \cdot \cos \frac{n\tilde{z}}{L} + K_{T_2} \cdot \sin \frac{n\tilde{z}}{L}) \cdot e^{j(\omega t - \gamma 2\pi X_1/l)} \quad (2.28)$$

$$\underline{A}_{\delta, x_1} = \int \frac{1}{L} \sum_{\gamma} \sum_{n}^{\infty} \frac{l \cdot n}{2\gamma} \cdot \underline{C}_0 \cdot (\operatorname{ch} \lambda_0 y + \underline{C}_0^* \cdot \operatorname{sh} \lambda_0 y) \cdot (K_{T_2} \cdot \sin \frac{n\tilde{z}}{L} - K_{T_1} \cdot \cos \frac{n\tilde{z}}{L}) \cdot e^{j(\omega t - \gamma 2\pi X_1/l)} \quad (2.29)$$

unde:

$$\lambda_0^2 = \left(\frac{2\pi\gamma}{l} \right)^2 + \left(\frac{n\tilde{z}}{L} \right)^2$$

Legind sistemul de referință de induct prin transformarea:

$$X_2 = X_1 - 2\tilde{C} \cdot f(1-S) \quad (2.30)$$

În mod similar, potențialul magnetic vector pentru stratul "i" este:

$$\underline{A}_{i, z} = \sum_{\gamma} \sum_{n}^{\infty} \underline{C}_i \cdot (K_{T_1} \cdot \cos \frac{n\tilde{z}}{L} + K_{T_2} \cdot \sin \frac{n\tilde{z}}{L}) \cdot e^{j(\omega t - \gamma 2\pi X_2/l)}$$

$$\cdot \left(\operatorname{ch} \lambda_i (y + \sum_{i=1}^{i-1} d_i) + \underline{C}'_i \cdot \operatorname{sh} \lambda_i (y + \sum_{i=1}^{i-1} d_i) \right) \quad (2.31)$$

$$\underline{A}_{i,x_2} = j \frac{1}{L} \sum_j \sum_n \frac{I \cdot n}{2 \cdot \gamma} \cdot \underline{C}_i (K_{T_1} \cdot \sin \frac{n\tilde{h}}{L} z - K_{T_2} \cdot \cos \frac{n\tilde{h}}{L} z) \cdot$$

$$\cdot \left(\operatorname{ch} \lambda_i (y + \sum_{i=1}^{i-1} d_i) + \underline{C}'_i \cdot \operatorname{sh} \lambda_i (y + \sum_{i=1}^{i-1} d_i) \right) \cdot$$

$$\cdot e^{j(\delta_y \omega t - \gamma 2\tilde{h} x_2 / l)} \quad (2.32)$$

unde:

$$\lambda_i^2 = \left(\frac{\gamma 2\tilde{h}}{L} \right)^2 + \left(\frac{n\tilde{h}}{L} \right)^2 + j\sigma \cdot \mu_i \cdot \delta_y \cdot \omega$$

$\delta_y = 1 - \gamma (1-s) m \cdot q \cdot \alpha \gamma_{\tilde{h}}$ (alunecarea armonicii de ordinul γ).

Pentru ultimul strat ($i-u$), a cărui grosime se consideră infinită, componentele potențialului magnetic vector sînt obținute din (2.31), (2.32) pentru $\underline{C}'_u = 1$.

Condițiile la limită.

Condițiile de continuitate pentru componentele tangențiale ale intensității cîmpului magnetic dau u+1 ecuații, iar condițiile de continuitate pentru componentele normale ale inducției magnetice formează încă u ecuații, obținînd un sistem de 2u+1 ecuații cu tot atîtea necunoscute ($\underline{C}_i, \underline{C}'_i$).

Continuitatea componentelor tangențiale ale cîmpului pentru suprafața inductor-întrefier conduc la:

$$\underline{H}_{\delta, x_1} \Big|_{y=\delta} = \frac{\partial \underline{e}}{\partial x_1} \quad \text{sau} \quad \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\partial \underline{A}_{\delta, z}}{\partial y} \Big|_{y=\delta} = \frac{\partial \underline{e}}{\partial x_1} \quad (2.33)$$

- la suprafața întrefier-induc:

$$\frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\partial \underline{A}_{\delta, z}}{\partial y} \Big|_{y=0/\mu_1} = \frac{1}{\mu_1} \cdot \frac{\partial \underline{A}_{1, z}}{\partial y} \Big|_{y=0} \quad (2.34)$$

- între stratul "i" și "i+1":

$$\frac{1}{\mu_i} \cdot \frac{\partial A_{i,z}}{\partial y} \Big|_{y=-\sum_{l=1}^i d_l} = \frac{1}{\mu_{i+1}} \cdot \frac{\partial A_{i+1,z}}{\partial y} \Big|_{y=-\sum_{l=1}^i d_l} \quad (2.35)$$

Condițiile de continuitate pentru componentele normale ale inducției magnetice determină următoarele ecuații:

- la suprafața întrefier-indus:

$$\frac{\partial A_{\delta, x_1}}{\partial z} - \frac{\partial A_{\delta, z}}{\partial x_1} \Big|_{y=0} = \frac{\partial A_{1, x_2}}{\partial z} - \frac{\partial A_{1, z}}{\partial x_2} \Big|_{y=0} \quad (2.36)$$

- între stratul "i" și "i+1" :

$$\frac{\partial A_{i, x_2}}{\partial z} - \frac{\partial A_{i, z}}{\partial x_2} \Big|_{y=-\sum_{l=1}^i d_l} = \frac{\partial A_{i+1, x_2}}{\partial z} - \frac{\partial A_{i+1, z}}{\partial x_2} \Big|_{y=-\sum_{l=1}^i d_l} \quad (2.37)$$

Cele 2 u+1 condiții conduc la sistemul următor :

$$\underline{C}_0 (\text{sh} \lambda_0 \delta + \underline{C}'_0 \cdot \text{ch} \lambda_0 \delta) = \frac{16 \mu_0}{\pi \cdot \lambda_0} \cdot \frac{N}{l} \cdot I_1 \cdot \sqrt{2} \cdot K_B \cdot e^{j\pi/m} \quad (2.38)$$

$$\underline{C}_1 \cdot \underline{C}'_1 = \frac{\lambda_0 \cdot \mu_1}{\mu_0 \cdot \lambda_1} \underline{C}_0 \cdot \underline{C}'_0 \quad (2.39)$$

$$\underline{C}_i (\underline{C}'_i \cdot \text{ch} \lambda_i \cdot d_i - \text{sh} \lambda_i \cdot d_i) = \frac{\mu_i \cdot \lambda_{i+1}}{\mu_{i+1} \cdot \lambda_i} \cdot \underline{C}_{i+1} \cdot \underline{C}'_{i+1} \quad (2.40)$$

$$\underline{C}_1 = \underline{C}_0 \quad (2.41)$$

$$\underline{C}_i \cdot (\text{ch} \lambda_i \cdot d_i - \underline{C}'_i \cdot \text{sh} \lambda_i \cdot d_i) = \underline{C}_{i+1} \quad (2.42)$$

Rezolvat, sistemul de mai sus conduce la următoarele soluții:

$$\underline{C}'_u = 1$$

$$\underline{C}'_i = \frac{\underline{C}'_{i+1} \cdot \text{ch} \lambda_i \cdot d_i + \text{sh} \lambda_i \cdot d_i \cdot \frac{\mu_{i+1} \cdot \lambda_i}{\mu_i \cdot \lambda_{i+1}}}{\underline{C}'_{i+1} \cdot \text{sh} \lambda_i \cdot d_i + \text{ch} \lambda_i \cdot d_i \cdot \frac{\mu_{i+1} \cdot \lambda_i}{\mu_i \cdot \lambda_{i+1}}} \quad (2.43)$$

$$\underline{C}'_0 = \frac{\mu_0 \cdot \lambda_1}{\mu_1 \cdot \lambda_0} \cdot \underline{C}'_1 \quad (2.44)$$

$$\underline{C}_0 = \frac{16 \cdot \mu_0 \cdot N \cdot I_1 \cdot \sqrt{2} \cdot K_R \cdot e^{-46 \frac{\tilde{h}}{m}}}{\tilde{L} \cdot \tilde{\pi} \cdot \lambda_0 \cdot (\operatorname{ch} \lambda_0 \delta + \underline{C}'_0 \cdot \operatorname{ch} \lambda_0 \cdot \delta)} \quad (2.45)$$

$$\underline{C}_1 = \underline{C}_0 \quad (2.46)$$

$$\underline{C}_{i+1} = \underline{C}_i \cdot (\operatorname{ch} \lambda_i \cdot d_i - \underline{C}'_i \cdot \operatorname{sh} \lambda_i \cdot d_i) \quad (2.47)$$

II.4. Inducția magnetică; densitatea de curent.

Cunoscînd potențialul magnetic vector, inducția magnetică se calculează din $\underline{B} = \operatorname{rot} \underline{A}$, ceea ce înseamnă :

$$\underline{B}_y = \frac{\partial \underline{A}_x}{\partial z} - \frac{\partial \underline{A}_z}{\partial x} ; \quad (2.48)$$

$$\underline{B}_x = \frac{\partial \underline{A}_z}{\partial y} ; \quad (2.49)$$

$$\underline{B}_z = -\frac{\partial \underline{A}_x}{\partial y} ; \quad (2.50)$$

ajungîndu-se în final, la următoarele expresii.

$$\underline{B}_{\delta, y} = j \sum_n \sum_y \frac{\tilde{L}}{2\tilde{\pi} \tilde{y}} \cdot \lambda_0^2 \cdot \underline{C}_0 \cdot (K_{T_1} \cdot \cos \frac{n\tilde{h}}{L} z + K_{T_2} \cdot \sin \frac{n\tilde{h}}{L} z) \cdot (\operatorname{ch} \lambda_0 y + \underline{C}'_0 \cdot \operatorname{sh} \lambda_0 \cdot y) \cdot e^{j(\omega t - \tilde{y} 2\tilde{\pi} X_1 / \ell)} \quad (2.51)$$

$$\underline{B}_{\delta, x_1} = \sum_n \sum_y \underline{C}_0 \cdot \lambda_0 (K_{T_1} \cdot \cos \frac{n\tilde{h}}{L} z + K_{T_2} \cdot \sin \frac{n\tilde{h}}{L} z) \cdot (\operatorname{sh} \lambda_0 y + \underline{C}'_0 \cdot \operatorname{ch} \lambda_0 \cdot y) \cdot e^{j(\omega t - \tilde{y} 2\tilde{\pi} X_1 / \ell)} \quad (2.52)$$

$$\underline{B}_{\delta, z} = -j \frac{1}{L} \sum_n \sum_y \frac{\tilde{L} \cdot n}{2\tilde{y}} \cdot \lambda_0 \cdot (K_{T_1} \cdot \sin \frac{n\tilde{h}}{L} z - K_{T_2} \cdot \cos \frac{n\tilde{h}}{L} z) \cdot \underline{C}_0 \cdot (\operatorname{sh} \lambda_0 y + \underline{C}'_0 \cdot \operatorname{ch} \lambda_0 \cdot y) \cdot e^{j(\omega t - \tilde{y} 2\tilde{\pi} X_1 / \ell)} \quad (2.53)$$

$$\underline{H}_{i,y} = j \sum_n^{\infty} \sum_{\gamma}^{\infty} \frac{l}{2\gamma} \cdot \lambda_0^2 \cdot \underline{C}_i (K_{T_1} \cdot \cos \frac{n\tilde{h}}{L} z + K_{T_2} \cdot \sin \frac{n\tilde{h}}{L} z) \cdot \left(\text{ch} \underline{\lambda}_i (y + \sum_{i=1}^{i-1} di) + \underline{C}_i \cdot \text{sh} \underline{\lambda}_i (y + \sum_{i=1}^{i-1} di) \right) \cdot e^{j(\Delta_y \omega t - \gamma 2\tilde{\pi} X_2 / l)} \quad (2.54)$$

$$\underline{H}_{i,x_2} = \sum_n^{\infty} \sum_{\gamma}^{\infty} \underline{C}_i \cdot \underline{\lambda}_i \cdot (K_{T_1} \cdot \cos \frac{n\tilde{h}}{L} z + K_{T_2} \cdot \sin \frac{n\tilde{h}}{L} z) \cdot \left(\text{sh} \underline{\lambda}_i (y + \sum_{i=1}^{i-1} di) + \underline{C}_i \cdot \text{ch} \underline{\lambda}_i (y + \sum_{i=1}^{i-1} di) \right) \cdot e^{j(\Delta_y \omega t - \gamma 2\tilde{\pi} X_2 / l)} \quad (2.55)$$

$$\underline{H}_{i,z} = -j \frac{1}{L} \sum_n^{\infty} \sum_{\gamma}^{\infty} \frac{l \cdot n}{2\gamma} \cdot \underline{\lambda}_i \cdot (K_{T_1} \cdot \sin \frac{n\tilde{h}}{L} z - K_{T_2} \cdot \cos \frac{n\tilde{h}}{L} z) \cdot \underline{C}_i \cdot \left(\text{sh} \underline{\lambda}_i (y + \sum_{i=1}^{i-1} di) + \underline{C}_i \cdot \text{ch} \underline{\lambda}_i (y + \sum_{i=1}^{i-1} di) \right) \cdot e^{j(\Delta_y \omega t - \gamma 2\tilde{\pi} X_2 / l)} \quad (2.56)$$

Pentru ultimul strat se ține seama că $\underline{C}_u^i = 1$.

Densitatea curentului electric indus în straturile secundarului se obține ușor cunoscând că $\underline{j} = -\sigma \frac{\partial A}{\partial t}$:

$$\underline{J}_{-i,x_2} = \frac{\tilde{\eta} \cdot \underline{\sigma}_i}{L} \cdot \sum_n^{\infty} \sum_{\gamma}^{\infty} \Delta_{\gamma} \cdot \omega \cdot \frac{l \cdot n}{2\gamma} \cdot \underline{C}_i \cdot (K_{T_1} \cdot \sin \frac{n\tilde{h}}{L} z - K_{T_2} \cdot \cos \frac{n\tilde{h}}{L} z) \cdot \left(\text{ch} \underline{\lambda}_i (y + \sum_{i=1}^{i-1} di) + \underline{C}_i \cdot \text{sh} \underline{\lambda}_i (y + \sum_{i=1}^{i-1} di) \right) \cdot e^{j(\Delta_y \omega t - \gamma 2\tilde{\pi} X_2 / l)} \quad (2.57)$$

$$\underline{J}_{-i,z} = -j \underline{\sigma}_i \sum_n^{\infty} \sum_{\gamma}^{\infty} \Delta_{\gamma} \cdot \omega \cdot \underline{C}_i \cdot (K_{T_1} \cdot \cos \frac{n\tilde{h}}{L} z + K_{T_2} \cdot \sin \frac{n\tilde{h}}{L} z) \cdot \left(\text{ch} \underline{\lambda}_i (y + \sum_{i=1}^{i-1} di) + \underline{C}_i \cdot \text{sh} \underline{\lambda}_i (y + \sum_{i=1}^{i-1} di) \right) \cdot e^{j(\Delta_y \omega t - \gamma 2\tilde{\pi} X_2 / l)} \quad (2.58)$$

11.5. Calculul forțelor.

Calculul forțelor se face cu ajutorul tensiunilor Maxwelliene, folosindu-se și alte relații de verificare stabilite în paragrafele următoare.

11.5.1. Calculul forței longitudinale.

Exprimarea forței longitudinale F_x , pe baza tenso-

lui lui Maxwell T_x , are format:

$$F_x = \int_0^l \int_{-L/2}^{L/2} T_x \cdot dx_1 \cdot dz \quad (2.59)$$

unde $T_x = \frac{Re \left[\frac{B_{\delta,y} \cdot B_{\delta,x1}^*}{2 \cdot \mu_0} \right] \Big|_{y=0}$ - tensorul corespunzător suprafeței elementare $dx_1 \cdot dz$, după axa OX:

$$T_x = \sum_n \sum_\nu Re \left[\frac{j \cdot I}{\mu_0 \cdot 2\pi\nu} \cdot \lambda_0^2 \cdot C_0 \cdot C_0^* \cdot (K_{T1}^2 \cos^2 \frac{n\tilde{z}}{L} + K_{T1} \cdot K_{T2} \cdot \sin \frac{2n\tilde{z}}{L} + K_{T2}^2 \sin^2 \frac{n\tilde{z}}{L}) \cdot \lambda_0 \cdot C_0^* \cdot e^{-j(\omega t - \nu) \frac{2\tilde{z}}{l} x_1} \cdot e^{j(\omega t - \nu) 2\tilde{z} x_1 / l} \right] \quad (2.60)$$

Efectuînd integrala se obține:

$$F_x = \frac{I \cdot l^2}{8\pi\mu_0} \cdot \sum_n \sum_\nu \frac{1}{\nu} \cdot \lambda_0^3 \cdot |C_0|^2 \cdot I_m(C_0) \cdot (K_{T1}^2 + K_{T2}^2) \quad (2.61)$$

II.5.2. Calculul forței normale.

În mod analog, aflarea forței normale F_y se face folosind tensorul maxwellian T_y :

$$T_y = \frac{Re \left[\frac{B_{\delta,y} \cdot B_{\delta,y}^* - B_{\delta,z} \cdot B_{\delta,z}^* - B_{\delta,x1} \cdot B_{\delta,x1}^*}{2 \cdot \mu_0} \right] \Big|_{y=0}} \quad (2.62)$$

Forța normală F_y rezultă prin integrare:

$$F_y = \int_0^l \int_{-L/2}^{L/2} T_y \cdot dx_1 \cdot dz \quad (2.63)$$

După efectuarea calculelor se obține expresia ^{forței} normale:

$$F_y = \frac{L_0 \cdot l^3}{32 \cdot \pi^2 \cdot \mu_0} \cdot \sum_n \sum_\nu \frac{\lambda_0^4}{\nu^2} \cdot (K_{T1}^2 + K_{T2}^2) / C_0^2 \cdot (1 - |C_0|^2) \quad (2.64)$$

O altă metodă de determinare a forței normale are în bază derivata energiei magnetice a mașinii în raport cu întrefierul:

$$F_y = \frac{d}{d\delta} (W) \Big|_{I=ct} \quad (2.65)$$

unde

W - energia magnetică a mașinii dată la § II.6.

Sînt două fenomenele care determină sensul și valoarea forței normale:

- 1) prezența curenților induși care generează un efect de repulsie, rezultînd forța de levitație;
- 2) permeabilitatea magnetică a indusului feromagnetic diferită de cea a aerului, rezultînd un efect de atracție - forța de atracție.

Problema ghidajului și a suspensiei este mult influențată de valoarea și sensul forței normale.

La mașinile electrice rotative, forțele normale fiind egale și de sens contrar se anulează și nu intervin în calculul de dimensionare al mașinii.

Materialul indusului, alunecarea de funcționare, tipul alimentării ($I = ct$ sau $U = ct$), efectul longitudinal, influențează valoarea forței de levitație sau de atracție.

II.5.3. Calculul forței transversale.

Forța transversală F_z apare numai la o plasare asimetrică a indusului față de inductor ($\xi \neq 0$, fig.2.2) și are sensul corespunzător principiului energiei magnetice minime. Mărimea ξ caracterizează descentrarea indusului față de inductor și reprezintă lungimea dintre originea sistemului de coordonate și axa de simetrie a inductorului.

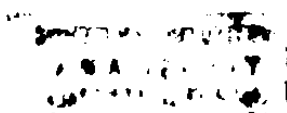
Forța transversală se obține prin utilizarea tenzorului lui Maxwell, T_z , în mod similar ca la forța longitudinală și normală:

$$T_z = \frac{R_e}{2 \cdot \mu_0} \left[\underline{B}_{\delta,y} \cdot \underline{B}_{\delta,z}^* \right] \Big|_{y=0} \quad (2.66)$$

și astfel

$$F_z = \int_0^l \int_{-(c+h+\xi)}^{c-\xi+h} T_z \cdot dx_1 \cdot dz \quad (2.67)$$

devine:



$$F_z = \sum_{\nu} \sum_n \frac{l^3 \cdot \lambda_0^3 \cdot /c_0'^2}{16 \cdot \mu_0 \cdot \pi^2 \cdot \nu^2} \left[(K_{T1}^2 - K_{T1}^2) \cdot \sin \frac{2n\pi \xi}{L} + 2 \cdot K_{T1} \cdot K_{T2} \cdot \cos \frac{2n\pi \xi}{L} \right] \cdot R_0(c_0') \cdot \sin \frac{(c+h)2n\pi}{L} \quad (2.68)$$

În plasarea simetrică a indusului față de inductor,

$$\left. \begin{aligned} \xi = 0 \text{ și } K_{T1} &= K_T \\ K_{T2} &= 0 \end{aligned} \right\} \text{ și } F_z = 0.$$

Calculul matematic al forței F_z se poate face și pe baza derivatei energiei magnetice - W -a ansamblului indus - întrefier în raport cu descentrarea ξ :

$$F_z = \frac{d}{d\xi} (W) \quad (2.69)$$

II.6. Putere, pierderi, η , $\cos \varphi$.

Puterea electromagnetică activă în întrefierul mașinii se calculează prin integrarea vectorului lui Poynting pe suprafața inductorului, la $y = \delta$:

$$P = R_0(\underline{S}) = R_0 \left[\frac{1}{T} \int_{\Sigma} (\underline{H}_x^* \cdot \underline{E}_z - \underline{E}_x \cdot \underline{H}_z^*) ds \right] \quad (2.70)$$

Efectuînd-se integrala se obține:

$$\underline{S} = -j \sum_n \sum_{\nu} \frac{\lambda_0^3 \cdot L \cdot l \cdot /c_0'^2 \cdot \omega}{4 \cdot \mu_0} \cdot \left(\frac{l}{2\pi\nu} \right)^2 \cdot (\operatorname{sh} \lambda_0 \delta + c_0' \cdot \operatorname{ch} \lambda_0 \delta) \cdot (\operatorname{ch} \lambda_0 \delta + c_0' \cdot \operatorname{sh} \lambda_0 \delta) \cdot (K_{T1}^2 + K_{T2}^2) \quad (2.71)$$

$$P = R_0(\underline{S}) - \text{puterea electromagnetică activă.} \quad (2.72)$$

$$Q = I_m(\underline{S}) - \text{puterea electromagnetică reactivă.} \quad (2.73)$$

La același rezultat se ajunge și prin însumarea puterii electromagnetice a tuturor fazelor. Pentru o fază puterea electromagnetică se exprimă sub forma :

$$P_K = R_e \left[\frac{U_{eK}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{1,K}^*}{\sqrt{2}} \right] \quad (2.74)$$

unde

U_{eK} - tensiunea indusă în faza "K", calculată din:

$$U_{eK} = - N \cdot \frac{d\phi_K}{dt} = - N \cdot \frac{d}{dt} \left[- \sum_n \sum_\gamma \frac{8 I_n \cdot \ell^2}{(2\pi\gamma)^2 \cdot \tilde{\mu}} \cdot K_B \cdot \lambda_o^2 \cdot \underline{C}_o \cdot (K_{T_1}^2 + K_{T_2}^2) \cdot (\cos \lambda \delta + \underline{C}_o' \cdot \text{sh} \lambda \delta) \cdot e^{j(\omega t + \gamma \varphi \alpha (m+1-2K))} \right] \quad (2.75)$$

Puterea electromagnetică a tuturor fazelor:

$$P_\delta = - \sum_{K=1}^m R_e \left(\frac{U_{eK}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{1,K}^*}{\sqrt{2}} \right) = - U_o \left[\frac{1}{2} \cdot I_1 \cdot \sqrt{2} \cdot j\omega \cdot N \cdot \sum_n \sum_\gamma \frac{8 I_n \cdot \ell^2}{(2\pi\gamma)^2 \cdot \tilde{\mu}} \cdot K_B \cdot \lambda_o^2 \cdot \underline{C}_o \cdot (K_{T_1}^2 + K_{T_2}^2) \cdot (\text{ch} \lambda_o \cdot \delta + \underline{C}_o' \cdot \text{sh} \lambda \delta) \cdot e^{-j\tilde{\mu}/m} \right] \quad (2.76)$$

Relația (2.76) e analogă cu (2.72) și doar forma aparentă de scriere diferă.

În relația (2.71) apare factorul $1/\underline{C}_o'^2$ iar în (2.76) apare factorul \underline{C}_o . Avînd în vedere ceilalți factori ai relației (2.76), se observă că relația respectivă se poate aduce la forma relației (2.71).

Energia electromagnetică

Energia electromagnetică a ansamblului indus-intrefier se exprimă funcție de puterea reactivă (2.71) ca fiind:

$$W = \frac{1}{2} L_g I^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{X_B}{\omega} \right) \cdot I^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{Q}{I^2 \omega} \right) \cdot I^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q}{\omega} \quad (2.78)$$

unde

- L_R - inductivitatea generalizată a întrefierului,
- I - curentul generalizat corespunzător inductivității generalizate.

Pierderile de putere (puterea disipată sub formă de căldură) în indusul feromagnetic al mașinii se calculează însumând puterea activă disipată în fiecare strat în parte. Pentru stratul "i" puterea pierdută prin efect Joule-Lenz se calculează folosind relațiile (2.57), (2.58), pentru densitățile de curent:

$$P_i = \frac{1}{2} \int_{V_i} R_e \left(\frac{1}{\sigma} \dot{j}_{i,x_2} \cdot \dot{j}_{i,x_2}^* + \frac{1}{\sigma} \cdot \dot{j}_{i,z} \cdot \dot{j}_{i,z}^* \right) dv \quad (2.79)$$

Dar

$$\begin{aligned} \dot{j}_{i,x_2} \cdot \dot{j}_{i,x_2}^* &= \left(\frac{\pi \sigma}{L} \right)^2 \cdot \sum_n \sum_y \left(\lambda_y \cdot \omega \cdot \frac{l \cdot n}{2\pi y} \right)^2 \cdot /C_i /^2 \cdot \\ &\cdot \left(K_{T_1}^2 \cdot \sin^2 \frac{n\tilde{h}}{L} z - K_{T_1} \cdot K_{T_2} \sin \frac{2n\tilde{h}}{L} z + K_{T_2}^2 \cdot \cos^2 \frac{n\tilde{h}}{L} z \right) \\ &\cdot \left(\operatorname{ch} \lambda_i (y + \sum_{l=1}^{i-1} d_l) + C_i \cdot \operatorname{sh} \lambda_i (y + \sum_{l=1}^{i-1} d_l) \right) \cdot \left(\operatorname{ch} \lambda_i (y + \sum_{l=1}^{i-1} d_l) + \right. \\ &\left. + C_i \cdot \operatorname{sh} \lambda_i (y + \sum_{l=1}^{i-1} d_l) \right)^* \end{aligned} \quad (2.80)$$

$$\begin{aligned} \dot{j}_{i,z} \cdot \dot{j}_{i,z}^* &= \sigma^2 \cdot \sum_n \sum_y \left(\lambda_y \cdot \omega \right)^2 \cdot /C_i /^2 \cdot \left(K_{T_1}^2 \cdot \cos^2 \frac{n\tilde{h}}{L} z + \right. \\ &\left. + K_{T_2}^2 \cdot \sin^2 \frac{n\tilde{h}}{L} z + K_{T_1} \cdot K_{T_2} \cdot \sin \frac{2n\tilde{h}}{L} z \right) \cdot \left(\operatorname{ch} \lambda_i (y + \sum_{l=1}^{i-1} d_l) + \right. \\ &\left. + C_i \cdot \operatorname{sh} \lambda_i (y + \sum_{l=1}^{i-1} d_l) \right) \cdot \left(\operatorname{ch} \lambda_i (y + \sum_{l=1}^{i-1} d_l) + C_i \cdot \operatorname{sh} \lambda_i (y + \sum_{l=1}^{i-1} d_l) \right) \end{aligned} \quad (2.81)$$

Efectuînd calculele, se obține:

$$P_i = \frac{\sigma \cdot L \cdot l^3 \cdot \lambda_0^2 \cdot \omega^2}{4} \sum_n \sum_y /C_i /^2 \cdot \lambda_y^2 \cdot \left(\frac{1}{2\pi y} \right)^2 \cdot (K_{T_1}^2 + K_{T_2}^2) \cdot \int_{y = -(\sum_{l=1}^{i-1} d_l)}^{y = -(\sum_{l=1}^{i-1} d_l) + l} \left| \operatorname{ch} \lambda_i (y + \sum_{l=1}^{i-1} d_l) + C_i \cdot \operatorname{sh} \lambda_i (y + \sum_{l=1}^{i-1} d_l) \right|^2 \cdot dy \quad (2.82)$$

Deoarece:

$$\left| \operatorname{ch} \lambda_i (y + \sum_{l=1}^{i-1} d_l) + C_i \cdot \operatorname{sh} \lambda_i (y + \sum_{l=1}^{i-1} d_l) \right|^2 =$$

$$\begin{aligned}
 &= C_{ir}^{\prime 2} \cdot \frac{\operatorname{ch} 2\lambda_{ir}(y + \sum di) - \cos 2\lambda_{im}(y + \sum di)}{2} + \\
 &+ C_{im}^{\prime 2} \cdot \frac{\operatorname{ch} 2\lambda_{ir}(y + \sum di) - \cos 2\lambda_{im}(y + \sum di)}{2} + \\
 &+ C_{ir}^{\prime} \cdot \operatorname{sh} 2\lambda_{ir}(y + \sum di) - C_{im}^{\prime} \cdot \sin 2\lambda_{im}(y + \sum di) + \\
 &+ \frac{\cos 2\lambda_{im}(y + \sum di) + \operatorname{ch} 2\lambda_{ir}(y + \sum di)}{2} \quad (2.83)
 \end{aligned}$$

unde

$$C_{ir}^{\prime} = R_e(C_i^{\prime}) \quad (2.84)$$

$$C_{im}^{\prime} = I_m(C_i^{\prime}) \quad (2.85)$$

$$\lambda_{ir} = R_e(\lambda_i) \quad (2.86)$$

$$\lambda_{im} = I_m(\lambda_i) \quad (2.87)$$

integrala (2.82) va rezulta ca fiind:

$$\begin{aligned}
 P_i &= \frac{\sigma \cdot L \cdot l^3 \cdot \lambda_0^2 \cdot \omega^2}{4} \cdot \sum_n \sum_{\gamma} C_i^{\prime 2} \cdot \Delta_{\gamma}^2 \cdot \left(\frac{1}{2\pi\gamma}\right)^2 \cdot (K_{T1}^2 + K_{T2}^2) \cdot \\
 &\cdot \left[\frac{\sin 2\lambda_{im} \cdot di}{4\lambda_{im}} (|C_i^{\prime}|^2 - 1) - \frac{\operatorname{sh} 2\lambda_{ir} \cdot di}{4\lambda_{ir}} (|C_i^{\prime}|^2 + 1) + \right. \\
 &\left. + \frac{C_{ir}^{\prime} \cdot (\operatorname{ch} 2\lambda_{ir} \cdot di - 1)}{2\lambda_{ir}} + \frac{C_{im}^{\prime} (\cos 2\lambda_{im} \cdot di - 1)}{2 \cdot \lambda_{im}} \right] \quad (2.88)
 \end{aligned}$$

Puterea totală disipată în indus rezultă însumând puterile straturilor P_i :

$$P_T = \sum_{i=1}^{i=\mu} P_i \quad (2.89)$$

Prin integrarea vectorului lui Poynting pe suprafața indusului, într-un sistem de coordonate legat de indus, se obține de asemenea puterea transformată în căldură în indusul mașinii:

$$P_{a1} = R_e \left[\frac{1}{2} \int_S \bar{E} * \bar{H}^* \cdot d\bar{s} \right] = \frac{1}{2} R_e \left[\int_S (\underline{H}_x^* \cdot \underline{E}_z - \underline{E}_x \cdot \underline{H}_z^*) \cdot d\bar{s} \right] =$$

$$= I_m \left[\frac{L \cdot l^3 \cdot \lambda_1^* \cdot |C_1|^2 \cdot C_1^* \cdot \lambda_1 \cdot \omega \cdot \lambda_0^2 \cdot (K_{T1}^2 + K_{T2}^2)}{4 \cdot \mu_1 \cdot (2\pi)^2} \right] \quad (2.90)$$

Relațiile (2.89) și (2.90) conduc la rezultate identice. Scăzând din puterea totală P, puterea pierdută în indus obținem puterea mecanică utilă dezvoltată de M.L. în regim de motor:

$$P - P_T = F_x \cdot V \quad (2.91)$$

Relația (2.91) reprezintă încă o formă de calcul a forței longitudinale și a fost folosită în programele de calcul ca o verificare a relației (2.59).

Randamentul mașinii, în regim de motor, se poate scrie sub forma:

$$\eta = \frac{F_x \cdot V}{P + 3 \cdot R \cdot I^2} \quad (2.92)$$

unde : $3 RI^2$ - pierderile de putere în inductor (R, X_G - rezistența, respectiv reactanța inductorului).

Factorul de putere se obține din raportul: putere activă/putere aparentă:

$$\cos \varphi = \frac{P + 3 R I^2}{\sqrt{(P + 3 R I^2)^2 + (Q + 3 X_G \cdot I^2)^2}} \quad (2.93)$$

La o M.L. cu datele: $l = 0.075$ m; $\zeta = 0.132$ m; $\delta = 0.0055$ m; $N = 32$; $Q = 1$; $p = 3$; în fig. 2.9. s-au reprezentat caracteristicile randamentului și a factorului de putere pentru o alimentare la curent constant, în funcție de alunecare.

Ca urmare a efectului longitudinal, randamentul devine nul la alunecări mai mari ca zero (înaintea sincronismului).

Factorul de putere se anulează la alunecări negative, la sincronism ($S = 0$) factorul de putere fiind diferit de zero și puterea electromagnetică activă ce trece prin întrefier plus puterea primită pe cale mecanică din exterior se transformă în căldură în indusul mașinii.

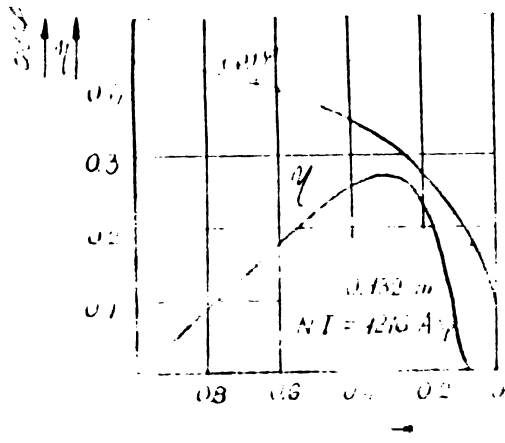


Fig.2.9. Variația randamentului și a factorului de putere cu alunecarea.

de influența plăcii de aluminiu a indusului asupra randamentului și a factorului de putere se poate vedea în fig.2.10 și fig.2.11.

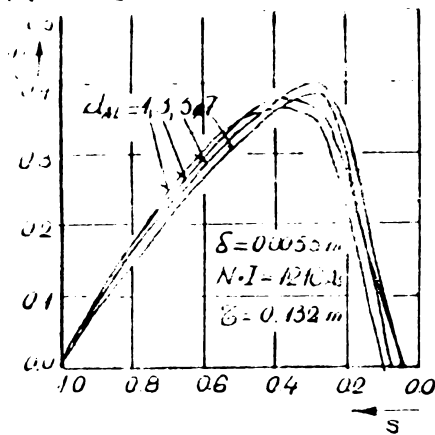


Fig.2.10. Variația randamentului.

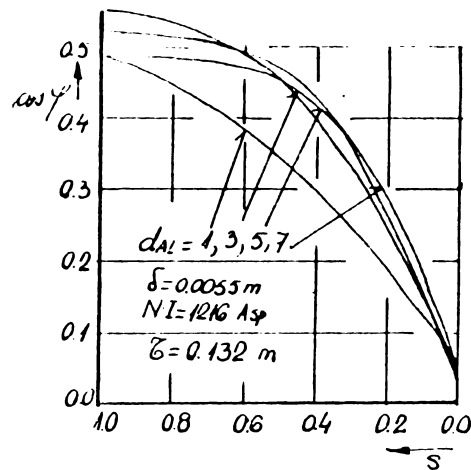


Fig.2.11. Variația factorului de putere.

d_{Al} - grosimea plăcii de aluminiu a indusului.

11.7. Tensiunea la borne.

În determinarea performanțelor M.L. s-a adoptat un sistem simetric de curenți presupuși cunoscuți, rezultând apoi toate celelalte mărimi.

Este absolut necesar să se procedeze astfel, deoarece parametrii indusului depind pe lângă alunecare și de solicitările magnetice determinate de solenația inductoare, deci de curentul de alimentare.

Deoarece impedanța ansamblului indus-întrefier, inițial, nu se cunoaște, determinarea tensiunii la borne se bazează pe cunoașterea curentului, iar calculul curentului la o tensiune dată se poate efectua numai iterativ, prin procedeul indicat în acest capitol.

Tensiunea indusă în faza "K" se obține din derivarea fluxului fazei respective în raport cu timpul:

$$\underline{U}_{eK} = - \frac{d\psi_K}{dt} \quad (2.94)$$

Fluxul magnetic rezultă prin integrarea câmpului magnetic al fazei analizate:

$$\begin{aligned} \frac{\psi_K}{K} = & - N \cdot \sum_{\gamma} \sum_n \frac{8 \cdot L \cdot (K_{T1}^2 + K_{T2}^2)}{(\gamma \frac{2\pi}{\lambda})^2 \cdot \pi} K_B \cdot \frac{\sin(\gamma q \alpha - \frac{\pi}{m})}{\sin m(\gamma q \alpha - \frac{\pi}{m})} \cdot \\ & \cdot \underline{C}_0 \cdot \lambda^2 \cdot (\operatorname{ch} \lambda \delta + \underline{C}'_0 \cdot \operatorname{sh} \lambda \delta) \cdot e^{j(\omega t + \gamma q \alpha (m + 1 - 2K))} \end{aligned} \quad (2.95)$$

și pe baza relației (2.95) rezultă tensiunea electromotoare indusă:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{eK} = & j \cdot \omega N \cdot \frac{2 \cdot I_1 \cdot l^2}{\pi^3} \cdot \sum_{\gamma} \sum_n \cdot \frac{K_B \cdot (K_{T1}^2 + K_{T2}^2)}{\gamma^2} \cdot \frac{\sin(\gamma \cdot q \cdot \alpha - \frac{\pi}{m})}{\sin m(\gamma q \alpha - \frac{\pi}{m})} \cdot \\ & \cdot \underline{C}_0 \cdot \lambda^2 \cdot (\operatorname{ch} \lambda \delta + \underline{C}'_0 \cdot \operatorname{sh} \lambda \delta) \cdot e^{j(\omega t + \gamma \cdot q \cdot \alpha (m + 1 - 2K))} \end{aligned} \quad (2.96)$$

Tensiunea la borne este suma dintre tensiunea indusă și căderile de tensiune pe partea inductoare:

$$\underline{U}_K = \underline{Z}_{1G} \cdot \underline{I}_1 - \underline{U}_{eK} \quad (2.97)$$

unde \underline{Z}_{1G} - impedanța inductorului (R_1 - rezistența pe fază a inductorului
 X_G - reactanța de dispersie a inductorului).

Procedeeul de calcul, la tensiune constantă, a performanțelor M.L. este următorul:

- Se admite o valoare inițială pentru curent și se calculează tensiunea la borne. Rezultă raportul dintre tensiunea la borne calculată și cea impusă: $U_{\text{calculat}} / U_{\text{impus}}$.

- Dacă $|1 - U_{\text{calculat}}/U_{\text{impus}}| < \epsilon_{\text{dat}}$, calculul în respectiva buclă e terminat, iar dacă nu e satisfăcută inegalitatea, atunci se modifică curentul cu raportul: $U_{\text{impus}}/U_{\text{calculat}}$ și calculul se reia.

În fig. 2.12 se dă alura forței longitudinale la o D.T.U. cu indus feromagnetic în funcție de alunecare la tensiune în borne constantă, respectiv curent de alimentare constant. În zona alunecărilor foarte mari ($1 + 0,5$), diferența între cele două curbe este neimportantă, curentul modificându-se foarte puțin cu alunecarea, la o tensiune de alimentare constantă și invers. Divergenții mari apar în zona sincronismului unde efectul de câmp total este predominant, ducând la o scădere mai accentuată a F_x cu alunecarea în cazul alimentării cu $U_k = \text{const.}$

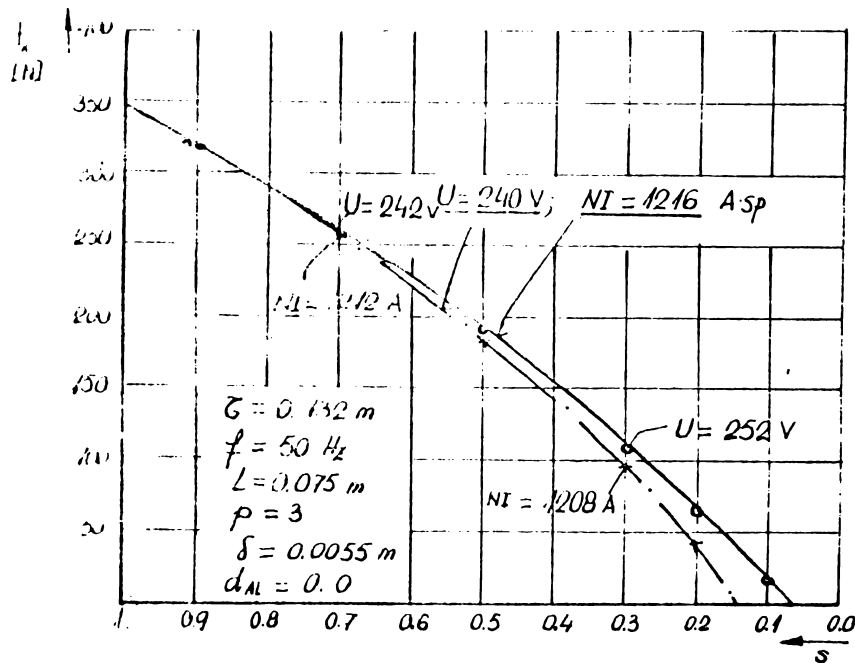


Fig.2.12. Variația forței de tracțiune la tensiune și la curent constant.

11.8. Variația permeabilităților magnetice, a cîmpului și a puterii straturilor indusului.

Permeabilitățile ce reprezintă straturile feromagnetice se consideră cele corespunzătoare suprafeței dinspre întrefier.

Inițial se dau valori arbitrare permeabilităților straturilor și pe baza curentului, presupus cunoscut, se determină cîmpul magnetic în indus și apoi se calculează valorile noi pentru permeabilități, calculul reluîndu-se printr-un proces iterativ de subrelaxare, convergența fiind rapidă la un coe-

ficient de subrelaxare între 0,85 + 0,95.

În fig. 2.13 este dată variația permeabilităților cu alunecarea.

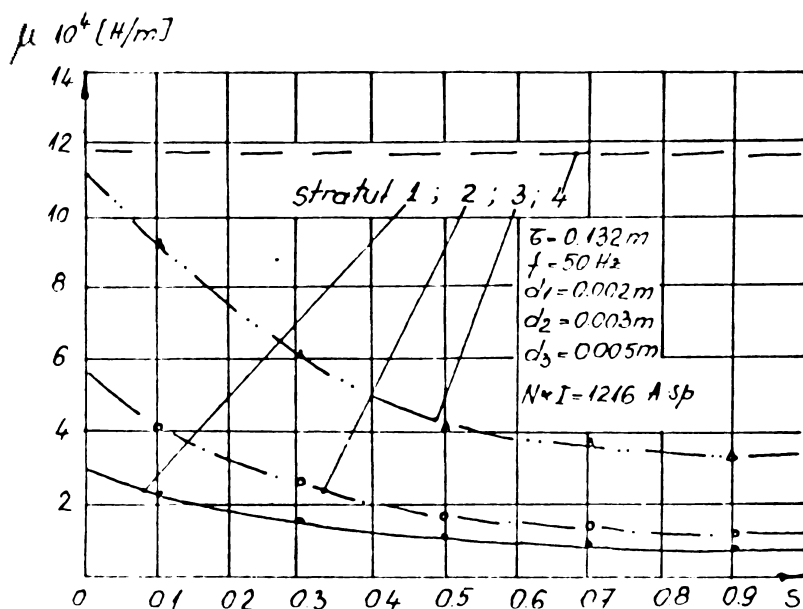


Fig.2.13. Variația permeabilităților magnetice ale straturilor, cu alunecarea.

Se observă ce mult se modifică μ atât cu adâncimea de pătrundere cât și cu alunecarea, aceasta demonstrând necesitatea considerării variației permeabilităților magnetice cu solicitările magnetice.

Cu creșterea alunecării, μ scade dată fiind creșterea frecvenței secundare și prin aceasta a saturației magnetice a indusului.

O dependență a cîmpului magnetic cu adâncimea de pătrundere în induș, la alunecare considerată ca parametru, este prezentată în fig. 2.14.

Conform fig.2.14, practic (pentru M.L. analizată), adâncimea de pătrundere pînă unde ajunge cîmpul este de 1 cm, observație deosebit de utilă în calculele de proiectare ale M.L.

Distribuția pierderilor prin efect Joule-Lenz pe adâncimea indusului este dată în fig.2.15.

Datorită efectului pelicular, 50% din putere se disipă în primii 3 mm, ce reprezintă mai puțin de 30% din distanța practică pînă la care pătrunde cîmpul electromagnetic în indușul maginii.

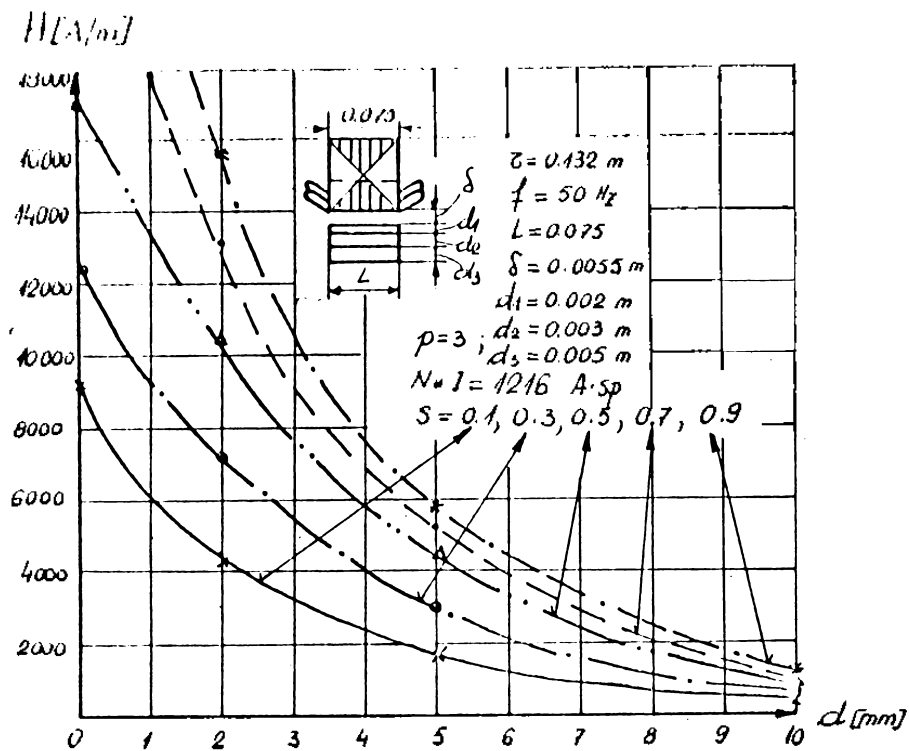


Fig. 2.14. Variația câmpului magnetic cu adâncimea de pătrundere.

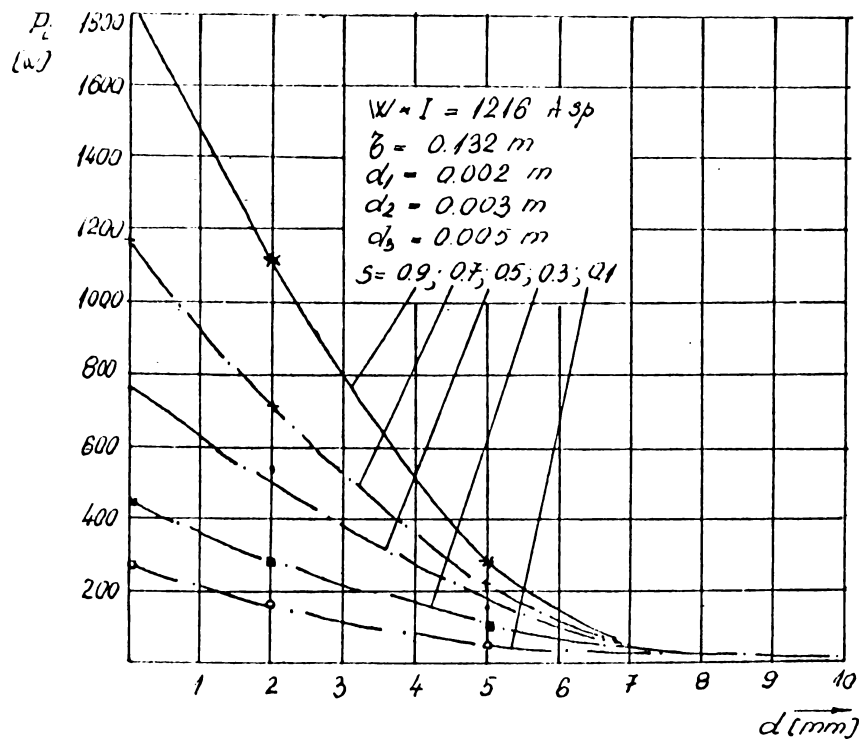


Fig. 2.15. Distribuția pierderilor de putere din indus, cu adâncimea de pătrundere.

Concluziile privind variația cîmpului electromagnetic și a distribuției pierderilor de putere cu adîncimea de pătrundere în oțelul feromagnetic al indusului, pot fi folosite și la calculul tratamentelor termice superficiale cum ar fi de exemplu călirea superficială a pieselor din oțel.

Dependența de alunecare a puterii active din întrefier P_a , și a pierderilor de putere din indus, P_{al} , este dată în fig. 2.16.

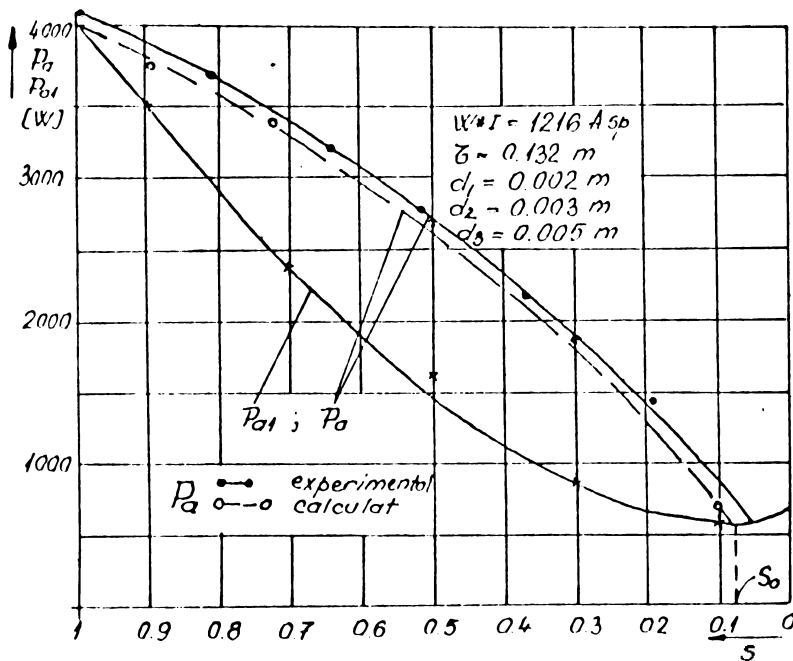


Fig. 2.16. Puterea activă din întrefier (P_a) și pierderile de putere din indus (P_{al}), funcție de alunecare.

În apropierea alunecării nule, la $s = s_0$, cînd forța longitudinală este zero, pierderile din indus sînt egale cu puterea electromagnetică ce trece prin întrefier. Aceeași situație este și la $s = 1$. Diferența ($P_a - P_{al}$) reprezintă puterea utilă dată de mașină în regim de motor (F.V).

II.9. Spectrul armonicilor cîmpului după axa longitudinală.

Forța longitudinală avînd în vedere armonicile cîmpului primare după lungimea mașinii, se analizează în continuare, dîndu-se spectrul ei.

Din fig. 2.17.a se observă contribuția armonicilor de ordin ν la forța de tracțiune, curbele reprezentate avînd ca parametru alunecarea. Armonica fundamentală ($\nu = p$) are cea mai mare pondere și aceasta depinde de alunecarea de func-

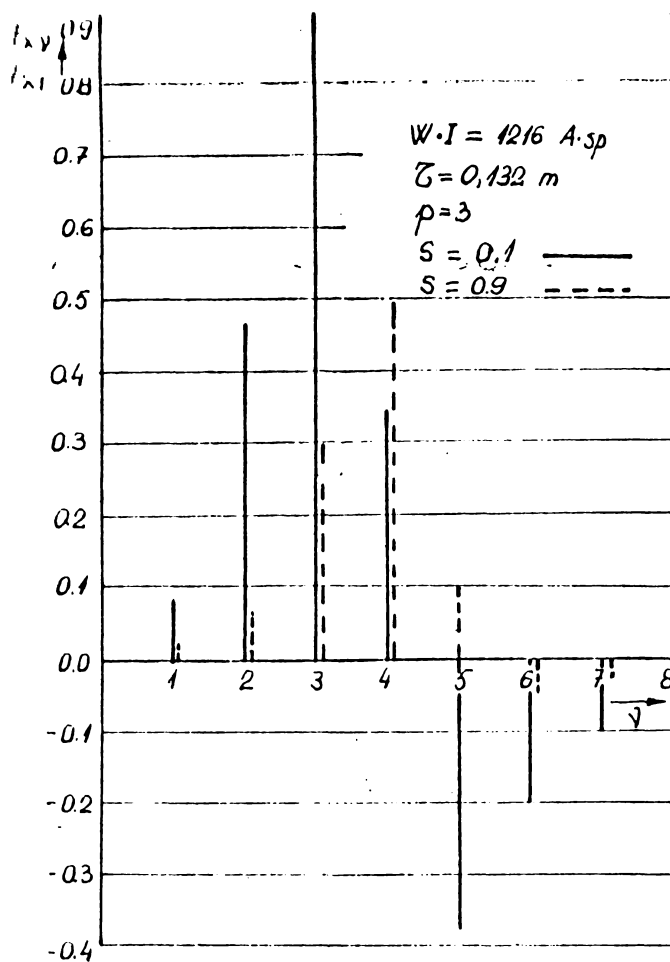


Fig.2.17 a.
Spectrul forței
longitudinale

v - armonicile sole-
nației după axa
longitudinală

s - alunecarea
(parametru)

F_{xy} - forța longi-
tudinală dată
de arminca \checkmark

F_{x1} - forța longi-
tudinală totală.

ționare. Armonicile de ordin superior lui "p+1" pot da forțe negative în zona alunecărilor reduse ($s < 0.3$). Ordinul armonicii preponderente scade cu scăderea alunecării. Având în vedere constatările mai sus expuse, rezultă ca absolut necesare considerarea armonicilor în calcule.

Practic aceasta se poate rezolva numai prin folosirea ordinatorului. Spectrul puterii active și reactive a ansamblului indus-întrefier este dat în continuare.

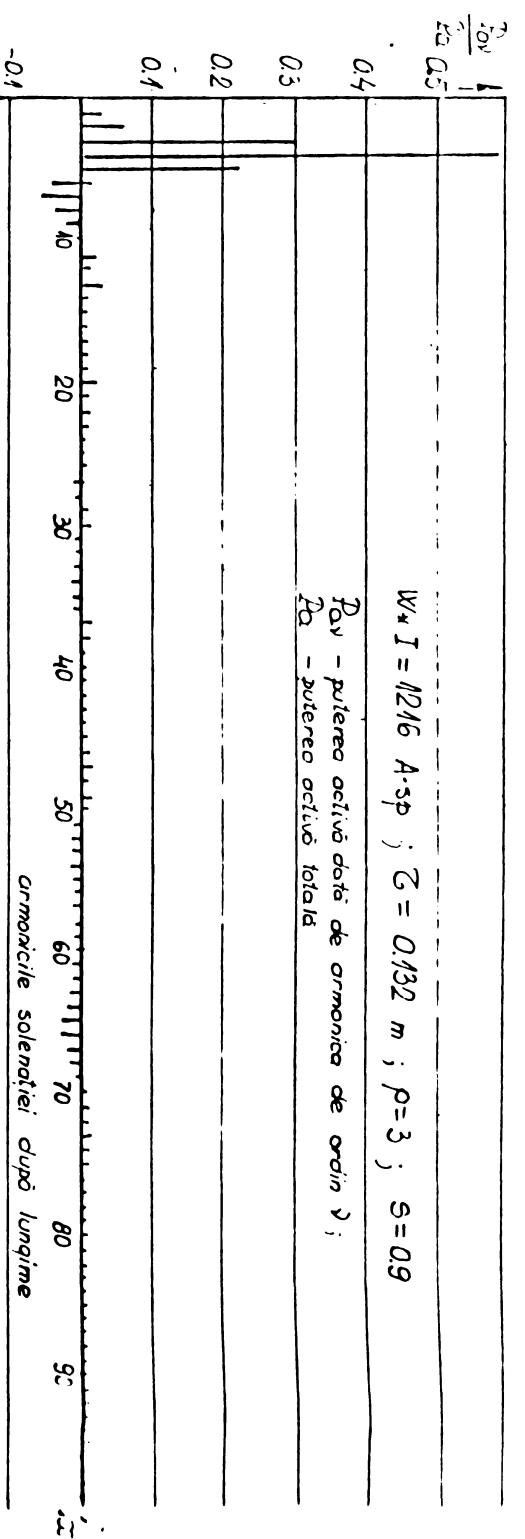


Fig. 2.17.b. Spectrul puterii active.

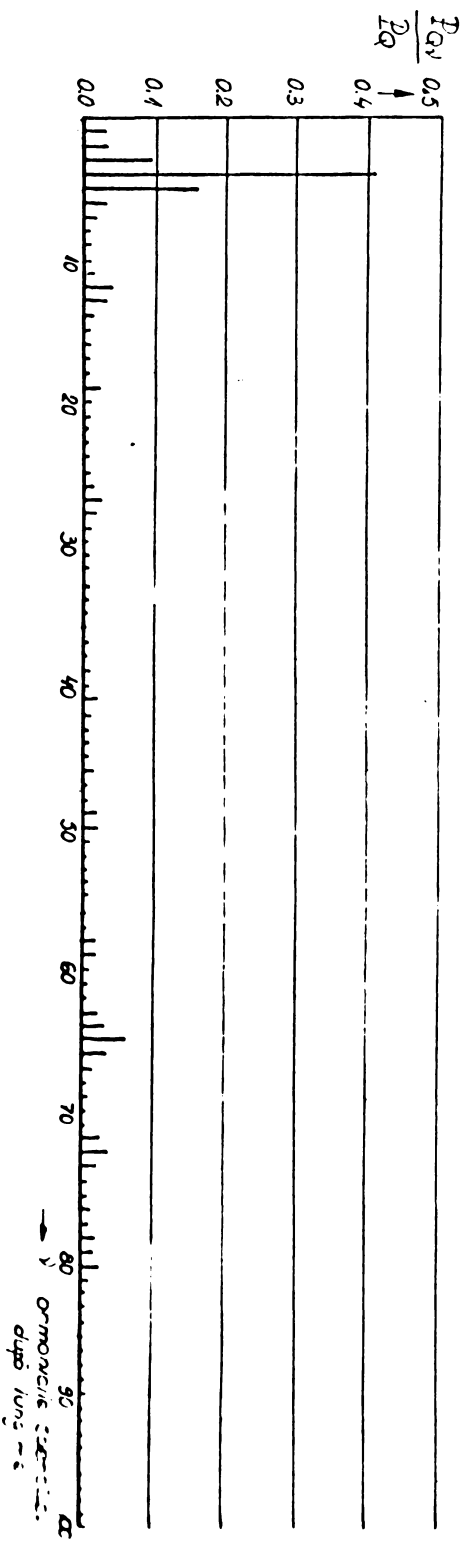


Fig. 2.17.c. Spectrul puterii reactive.

II.10. Caracteristicile forțelor.

Metoda straturilor este general valabilă oricare ar fi tipul indusului. In general, la M.L.U., se folosește ca indus o placă conductoare (aluminiu sau cupru), pe fier masiv.

In această situație primul strat (de grosime d_1) se consideră placa conductoare, care fiind nemagnetică are $\mu = \mu_0 = \text{ct}$ și următoarele straturi se iau pentru fierul masiv.

Influența plăcii conductoare nemagnetice (in cazul analizat: aluminiu) asupra caracteristicilor forțelor longitudinale, respectiv normale, este dată in fig. 2.18 și fig.2.19.

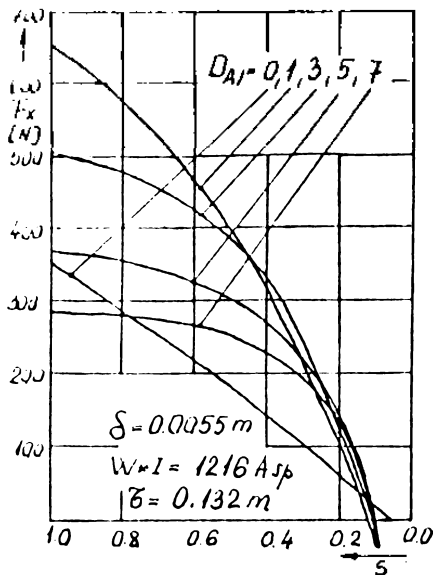


Fig.2.18.a. Caracteristicile mecanice pentru diferite grosimi de aluminiu .

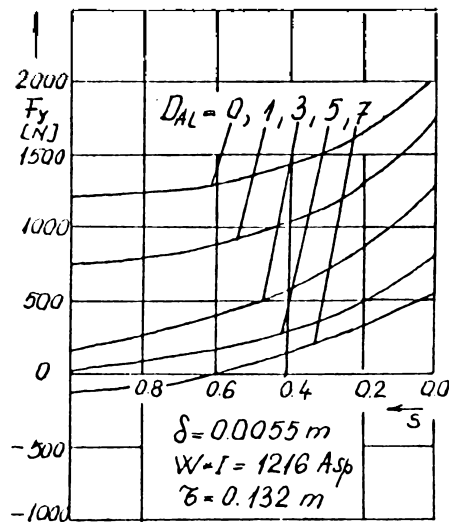


Fig.2.19. Caracteristicile forței normale la diferite grosimi ale aluminului.

Se observă contribuția importantă a plăcii de aluminiu atât la forța longitudinală cât și la cea normală.

La forța longitudinală apare o deplasare a punctului de maxim în zona motoare, prin grosimea plăcii de aluminiu fiind astfel posibilă obținerea alunecării critice în zona funcționării în regim de motor ($s = 0 + 1$). Cu creșterea pasului polar al maginii se îmbunătățește și factorul de calitate, caracteristicile mecanice deplasându-și punctul de maxim spre zona alunecărilor mici. La o M.L.U. cu un pas polar de 0,25 m caracteristicile forței longitudinale, cu și fără placă de aluminiu în indus, se dau in fig. 2.18.b

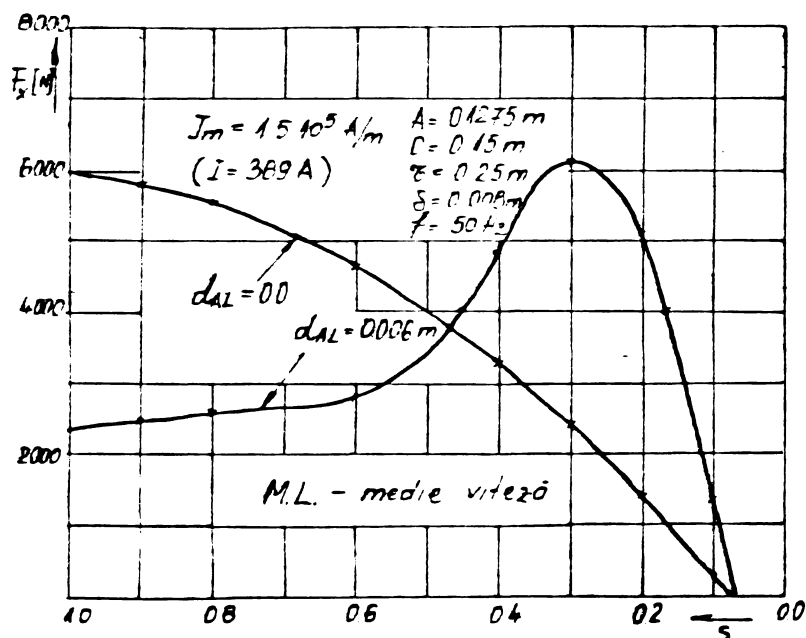


Fig.2.18.b. Caracteristicile mecanice la o M.L.U. de medie viteză.

Rezultatele au fost obținute folosind programul de calcul din anexa A.1.

La alunecări mari forța de levitație dată de curenții induși, pentru o placă de aluminiu de 7 mm, este mai mare decât forța atractivă dintre inductor și indus și forța normală rezultantă este repulsivă.

În fig.2.20 se dă forma de variație a forței transversale cu descentrarea, la două alunecări ($S = 0.2$; $S = 0.8$).

Punctul de maxim al forței transversale F_2 , în zona pozitivă, se deplasează spre stînga și se micșorează o dată cu alunecarea, fenomen explicat prin ponderea importantă, a curenților induși, la producerea forței transversale. În zona forțelor negative (deci de centrare), valorile maxime ale lui F_2 se modifică puțin cu alunecarea, forța transversală fiind determinată pe baza principiului reluctanței magnetice minime.

Modificarea caracteristicilor forțelor, la diferite descentrări ξ , se poate observa în fig.2.21 și fig.2.22.

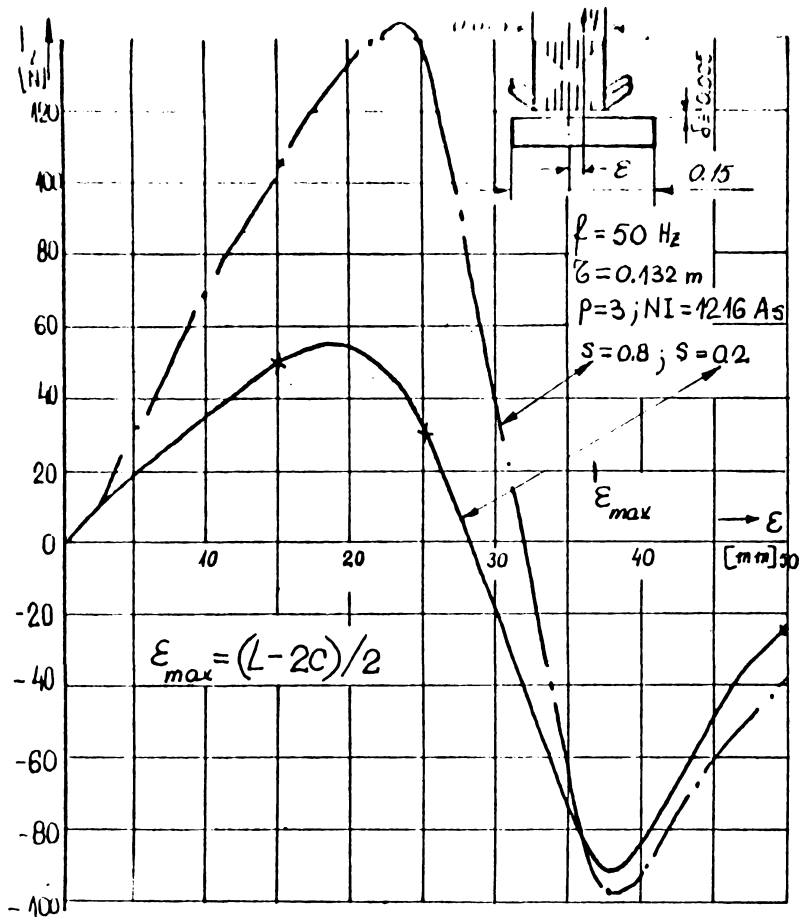


Fig. 2.20. Forța transversală în funcție de descentrare;
 ϵ_{\max} - descentrarea maximă a indusului față de inductor.

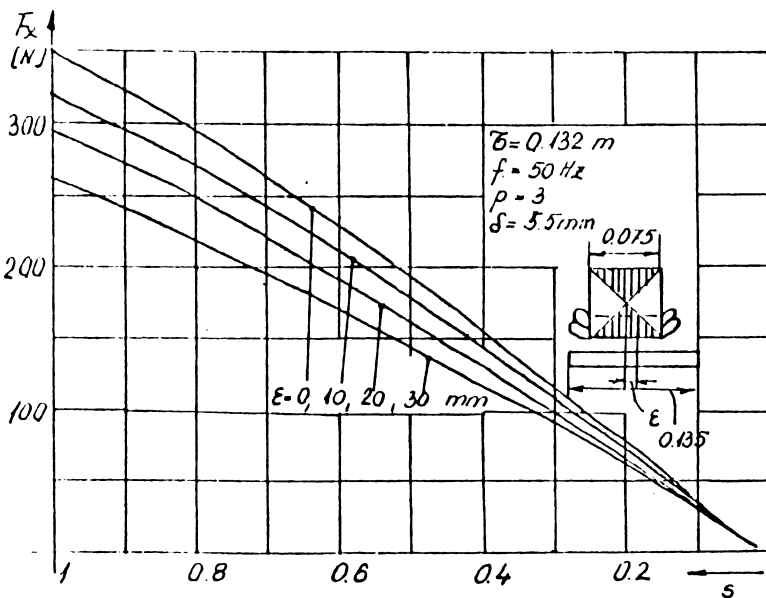


Fig. 2.21. Forța longitudinală în cazul nesimetric.

ϵ - descentrarea indusului față de inductor

$L = 0.135 \text{ m}$

$2c = 0.075 \text{ m}$

$W.I = 1216 \text{ A.s.p}$

S - alunecarea

Cu mărirea lui ϵ forța de tracțiune scade, modificarea cea mai mare avînd-o la $S = 1$ (la pornire).

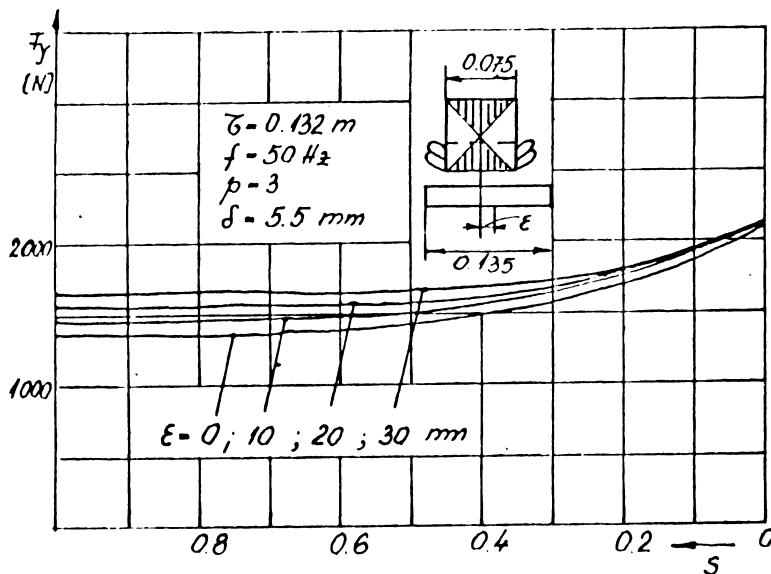


Fig.2.22. Forța normală în funcție de alunecare la diferite descentrări

ϵ - descentrarea
W.I = 1216 A.sp.

Se observă o mărire a valorii forței normale, la aceeași alunecare, cu atât mai mare cu cât descentrarea ϵ are valori mai ridicate. Creșterea valorii forței normale cu descentrarea, se explică prin reducerea ponderii forței de levitație a curenților induși.

Modificări mici, atât la forța de tracțiune cât și la cea normală, au loc în zona alunecărilor mici, și aceasta, fizic, se explică prin reacția curenților induși redusă în această zonă de alunecări și prin urmare situația diferă puțin față de cazul simetric.

II.11. Funcționarea M.L. în zona alunecărilor mici.

Înțelegem prin alunecări mici, la M.L., alunecările cuprinse în plaja $s \in [+0,1 \text{ } -0,1]$. Funcționarea M.L. în această zonă diferă mult de a unei mașini electrice rotative, datorită fenomenelor specifice, tratate fenomenologic la cap.I.

În fig. 2.23 sînt reprezentate datele obținute pe ordinator la calculul randamentului, factorului de putere, forței longitudinale și a puterilor active (din indus și din întrefier), în zona alunecărilor mici.

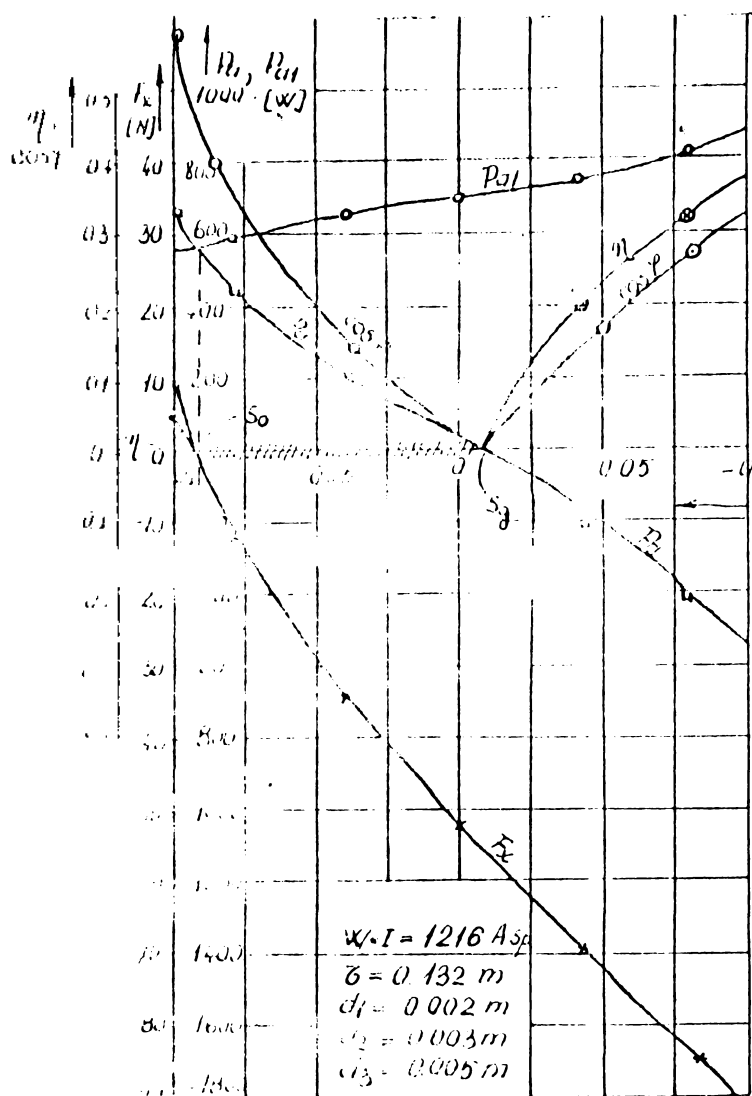


Fig.2.23. Comportarea M.L. la alunecări mici.

- P_a - puterea activă electromagnetică din întrefier
- P_{al} - pierderile de putere în "straturile", indusului
- F_x - forța longitudinală
- $S > S_0$ regim de motor
- $S < S_g$ regim de generator
- $S_g < S < S_0$ regim de frînă

La $s = S_0$, forța longitudinală și randamentul se anulează, pierderile de putere din indus sînt minime și egale cu puterea activă electromagnetică ce trece prin întrefier, punctul de funcționare separînd regimul de motor de cel de frînă (zona înșurată din figură).

Între " S_0 " și " S_g ", M.L. funcționează în regim de frînă în indusul feromagnetic al mașinii disipîndu-se puterea activă ce trece prin întrefier, plus puterea mecanică primită pe la arbore (forța longitudinală are alt sens și puterea mecanică schimbă și ea sensul).

La $S = S_g$, puterea activă trecută din inductor, prin întrefier, în indus devine nulă (la curent constant tensiunea la borne se anulează și ea) și în domeniul $S < S_g$, M.L. va trece în regim de generator primind putere mecanică pe la arbore și cedînd putere electrică în rețea (tensiunea la borne schimbă de sens).

Din cauza efectului longitudinal relația $F_x \cdot V_g = P_a$ (puterea electromagnetică a întrefierului) nu mai este satisfăcută și nici pierderile de putere din indus nu mai sînt egale cu alunecarea înmulțită cu puterea electromagnetică activă a întrefierului ($P_{al} \neq s \cdot P_a$).

La M.L., în orice punct ar funcționa, pe caracteristica mecanică:

$$F \cdot V_g < P_a \quad (2.86)$$

și

$$P_{al} > s \cdot P_a \quad (2.87)$$

Deci, în concluzie, în zona alunecărilor mici, apare în plus față de mașina asincronă rotativă, regimul de frînă datorat efectului longitudinal.

La M.L. pierderile din indus nu devin nule la nici o alunecare, avînd doar un minim la $S = S_0$ cînd mașina trece din regim de motor în cel de frînă.

II.12. Organigrama de calcul.

Metoda prezentată permite calculul performanțelor unui M.L. unilateral cu indus feromagnetic, pe un calculator de capacitate medie cu cel puțin 22 Koct la memoria operativă.

Programul general se compune din 2 părți (fig.2.24)

- în prima parte se calculează permeabilitățile magnetice ale straturilor, corespunzătoare solicitărilor magnetice date și apoi
- în partea a doua se calculează performanțele mașinii.

Curba de magnetizare a materialului feromagnetic al indusului se inițializează în 40 de trepte prin procedura BLOCK DATA.

Permeabilitățile magnetice ale straturilor se calculează printr-un procedeu de subrelaxare, la un coeficient de relaxare, $\beta = 0.9$, timpul de calcul fiind minim.

Listarea în FORTRAN-IV a programului este dată în anexa 1, și a fost obținută pe un calculator FELIX C-256.

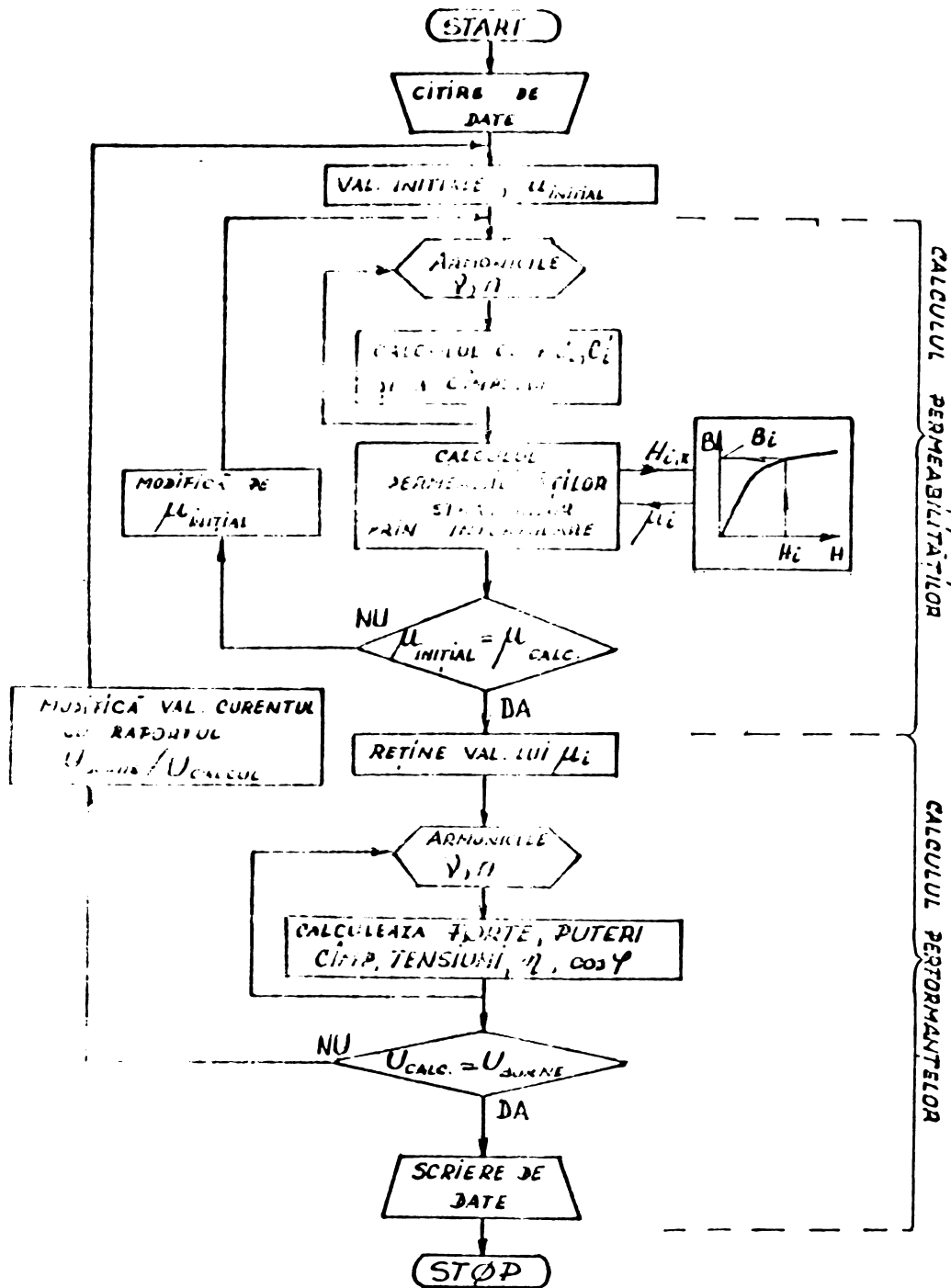


Fig. 2.24. Organigrama principală de calcul.

Precizia de determinare a permeabilităților magnetice μ_i ale straturilor, influențează mult durata de calcul. Obișnuit s-a lucrat cu $(\mu_{ki} - \mu_i) / \mu_{ki} \leq 0.1$ pe toate cele 4 straturi.

În fig. 2.24.b. se prezintă variația permeabilităților magnetice relative ale straturilor cu numărul de iterații, la două alunecări considerate ca parametru.

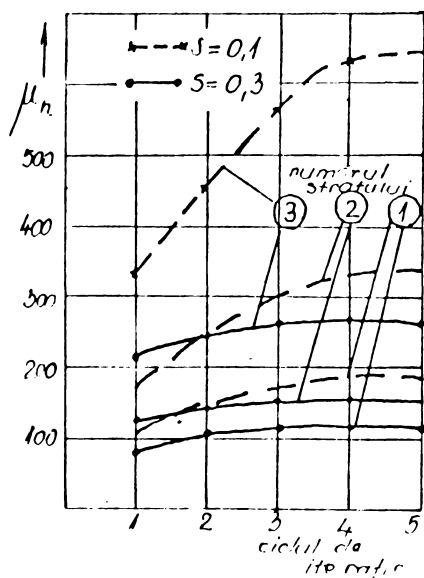


Fig.2.24.b Variația permeabilităților magnetice cu numărul de iterații.

Valoarea de calcul a permeabilităților a fost obținută după 4 iterații. S-a folosit programul de calcul dat în Anexa 2.

Pe baza permeabilităților magnetice μ_i ale straturilor, calculate la un anumit curent și la o anumită alunecare, folosind relațiile de calcul prezentate în paragrafele anterioare, se pot calcula toate mărimile ce definesc funcționarea mașinii.

Pentru calculul funcțiilor hiperbolice avînd ca argument o variabilă complexă, s-au folosit procedurile pentru funcții externe (funcții subprogram); în cazul programului anexat pentru sinh \rightarrow SINH și pentru cosh \rightarrow COSH.

Concluzii.

Metoda prezentată în în considerare simultan efectul longitudinal și cel transversal, cu considerarea saturației în rezolvarea ecuațiilor de câmp.

Calculul este posibil numai prin folosirea unui calculator de capacitate mijlocie + mare.

Relațiile obținute permit determinarea forțelor după cele trei direcții-longitudinală, normală și transversală.

Cîmpul magnetic e și el determinat atât în indușul feromagnetic al mașinii cît și în întrefierul ei.

Toate mărimile principale (forțe, puteri) au fost determinate folosindu-se 2 + 3 modalități, rezultatele obținute demonstrînd exactitatea studiului.

Timpul total de calcul, la un calculator FELIX C-256, pentru calculul performanțelor, la o alunecare dată, este de 10 + 20 minute.

Relațiile deduse se pot folosi la proiectarea și optimizarea M.L. unilaterale cu indus feromagnetic și la calculul destul de exact al performanțelor M.L. existente.

Metodica prezentată își justifică aplicabilitatea în-deosebi la M.L. de viteză mare folosite în tracțiunea electrică, acolo unde efectul longitudinal nu mai poate fi neglijat și unde problema unei dimensionări corecte a întregului sistem de acționare are o importanță mare în funcționare și în ridicarea gradului de fiabilitate.

Rezultatele teoretice obținute pe baza teoriei expuse, comparate cu cele obținute pe modele experimentale, dau erori sub 5%, teoria justificându-și astfel aplicabilitatea cu toate că necesită un volum mare de calcul.

La viteze mici și mijlocii și la M.L. unilateral cu indus feromagnetic, unde efectul longitudinal poate fi neglijat, ca metode de calcul se pretează mai bine metodicile prezentate la teoriile simplificate ale mașinii liniare.

Cap. III.

CALCULUL OPTIMAL AL M.L.U. FOLOSIND METODA STRATURILOR.

Optimizarea tehnico - economică a mașinii electrice în general și a M.L. în particular este o problemă cu un grad ridicat de complexitate și este puțin tratată în literatura de specialitate.

Din cauza diversității datelor de intrare este destul de dificil de a indica o metodologie general aplicabilă în vederea utilizării calculatoarelor numerice în calculul de optimizare, fiind deosebit de important modul în care sînt prinse fenomenele fizice din mașină în limbaj matematic.

Stabilirea dimensiunilor geometrice depinde de un ansamblu de condiții care caracterizează funcționarea mașinii.

În prezent, la calculul M.E. se folosesc programe

de analiză, unde se admit dimensiunile mașinii, ordinatorul determinând performanțele și programe de sinteză, în care se dau ordinatorului, ca date de intrare, mărimile caracteristice cu care trebuie să funcționeze mașina, urmând să fie determinate dimensiunile optime. [D 5].

Pentru reducerea timpului de calcul mare pretins de programele de sinteză bazate pe iterații, s-a recurs la proiectarea pe părți a mașinii electrice.

În continuare se va efectua un calcul pe părți, folosind metoda straturilor care ține seama simultan de efectele longitudinal, transversal și de cel de saturație.

III.1. Criteriile de optimizare.

Calculul optimal are la bază stabilirea inițială a unor criterii de optimizare.

Definind criteriile de optimizare, se poate ajunge la găsirea unor parametrii optimi ai M.L.

La M.L. de c.a. puterea aparentă sau puterea dimensională $S = m.U.I$, determină volumul inductorului iar puterea mecanică $P_{mec} = F_N \cdot V_N$ reprezintă puterea utilă.

Raportul:

$$A) \quad \frac{P_{mec}}{S} = \eta \cdot \cos \varphi \quad (3.1)$$

reprezintă unul din criteriile de optimizare iar mărimea:

$$B) \quad p_m = \frac{P_{mec}}{M_{inductor}} \quad (KW/Kg) \quad (3.2)$$

unde: $M_{inductor}$ - masa inductorului M.L.U.

constituie un alt criteriu de optimizare.

Intrefierul M.L., impus din considerente mecanice, influențează într-o mare măsură alegerea dimensiunilor geometrice. La o viteză dată, utilizarea unei frecvențe variabile permite alegerea unui pas polar suficient de mare, astfel ca M.L. obținută să fie puțin sensibilă la întrefierul mare. (fig.3.1).

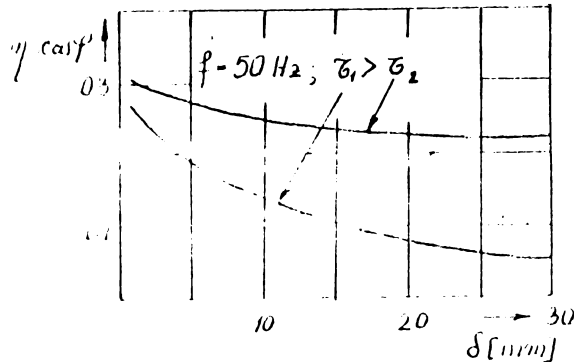


Fig.3.1. Influența pasului polar asupra variației produsului $\eta \cdot \cos \varphi$ cu întrefierul.

Curbele reprezentate demonstrează că ar fi de dorit $\delta = 0$, cerință imposibil de realizat practic. Nu apare un optim d.p.d.v. al întrefierului care este impus constructiv deoarece, performanțele mașinii scad cu creșterea întrefierului. Înțelegem, totuși, trage concluzia că la pași polari mari M.L. se comportă mai bine și variația produsului $\eta \cdot \cos \varphi$ nu este așa pronunțată în aceste cazuri.

Având în vedere, însă, efectul longitudinal ar fi de dorit un δ cât mai mic rezultând astfel un număr mai mare de poli.

Toate acestea conduc la concluzia că trebuie să existe un optim al produsului $\eta \cdot \cos \varphi$, la alegerea lui δ, z, δ_c .

Celelalte mărimi fizice și geometrice ce interesează în calculul de dimensionare sînt:

S_N (alunecarea nominală), p (numărul perechilor de poli), q (numărul de creștături pe pol și fază), j_{cu} (densitatea de curent în înfășurări), $2c$ (lățimea inductorului), L (lățimea indusului), $B_{\delta, y}$ mediu (inducția în întrefier), d_{Al} (grosimea plăcii de aluminiu a indusului).

Un q mic conduce la un coeficient de umplere bun (puține creștături) și la un cost scăzut al matrițelor iar un q mare determină o transmisie bună a căldurii de la înfășurări la pachetul de tole, reducînd totodată armonicile de creștere. În lucrare considerînd δ_c (pasul de creștătură) în limitele $2 + 5$ cm rezultă q :

$$q = \frac{\zeta}{\zeta_c \cdot 3} \quad (3.3)$$

Date inițiale:

Se consideră cunoscute:

V_N - viteza nominală a mașinii

F_N + forța necesară în funcționare.

Se contează pe o densitate de curent de :

$j_{cu} = 6 \text{ A/mm}^2$ (la clasele de izolație A,B,E)

și :

$j_{cu} = (7,2 + 9) \text{ A/mm}^2$ (la clasele de izolație F,H)

$j_{cu} = 10 \text{ A/mm}^2$ - la o răcire forțată cu apă.

Se ia în considerare un factor de umplere a creștăturii de 0,6 ($K_u = 0,6$).

Se studiază cazul simetric: $\xi = 0$ și deci $K_{T1} = K_T$;

$K_{T2} = 0$.

III.2. Metoda de proiectare optimă.

Esențial în calculul de proiectare este alegerea și menținerea constantă a inducției din întrefier, pentru a avea sollicitări electromagnetice constante.

În mod concret, s-a ales pentru inducție valoarea $B_{\delta y \text{ mediu}} = 0,3 \text{ T}$.

Având fixată valoarea inducției din întrefier se determină solenația primară $NI_1 \sqrt{2}$, din 2.51, sub forma:

$$NI_1 \sqrt{2} = \frac{|B_{\delta y}|}{\mu_0} \cdot \frac{\tilde{I}^2}{\left| \sum_{\gamma} \sum_{\alpha} \frac{K_T \cdot K_T \cdot \lambda_0 (\text{ch} \lambda_0 \delta + \frac{c_0}{\lambda_0} \cdot \text{sh} \lambda_0 \delta)}{\lambda_0 (\text{sh} \lambda_0 \delta + \frac{c_0}{\lambda_0} \cdot \text{ch} \lambda_0 \delta)} \right|} = \frac{\tilde{I}^2 |B_{\delta y}|}{e^{j(\frac{\pi}{m} - \gamma \delta)} | \mu_0 \cdot \lambda } \quad (3.4)$$

unde:

$$A = \left| \sum_{\gamma} \sum_{\alpha} \frac{K_B \cdot K_T \cdot \lambda_0 (\operatorname{ch} \lambda_0 \delta + \underline{C}_0' \cdot \operatorname{sh} \lambda_0 \delta)}{\gamma \cdot (\operatorname{sh} \lambda_0 \delta + \underline{C}_0' \cdot \operatorname{ch} \lambda_0 \delta)} e^{j(\frac{\pi}{m} - \gamma) \pi} \right|$$

Puterea activă calculată folosind relația (2.71), devine:

$$P = R_e \left[\frac{1}{2} (NI_1 \sqrt{2})^2 \cdot j \cdot \omega \cdot \sum_{\gamma} \sum_{\alpha} \frac{8 \cdot L \cdot l^2}{(2\pi\gamma)^2 \cdot \pi} \cdot K_B^2 \cdot K_T^2 \cdot \frac{16 \mu_0 \cdot \lambda_0}{l \cdot \pi \cdot (\operatorname{sh} \lambda_0 \delta + \underline{C}_0' \cdot \operatorname{ch} \lambda_0 \delta)} \cdot (\operatorname{ch} \lambda_0 \delta + \underline{C}_0' \cdot \operatorname{sh} \lambda_0 \delta) \right] =$$

$$= R_e \left[\frac{j \omega}{2} \cdot \frac{|\underline{B}_{\delta, y}|^2 \cdot l \cdot L}{2 \cdot \mu_0 \cdot A^2} \sum_{\gamma} \sum_{\alpha} \frac{K_B^2 \cdot K_T^2 \cdot \lambda_0 \cdot (\operatorname{ch} \lambda_0 \delta + \underline{C}_0' \cdot \operatorname{sh} \lambda_0 \delta)}{\gamma^2 \cdot (\operatorname{sh} \lambda_0 \delta + \underline{C}_0' \cdot \operatorname{ch} \lambda_0 \delta)} \right] \quad (3.5)$$

Pierderile de putere în indusul mașinii conform relației (2.90):

$$P_{al} = I_m \left[\sum_{\gamma} \sum_{\alpha} \frac{L \cdot l \cdot \underline{d}_A^* \cdot \underline{C}_A'^* \cdot s \gamma \cdot \omega \cdot K_B^2 \cdot K_T^2 \cdot |\underline{B}_{\delta, y}|^2}{4 \cdot \mu_0 \cdot \gamma^2 \cdot A^2 \cdot |\operatorname{sh} \lambda_0 \delta + \underline{C}_0' \cdot \operatorname{ch} \lambda_0 \delta|^2} \right] \quad (3.6)$$

Puterea mecanică cedată de M.L.:

$$P_{mec} = P_a - P_{al} = \frac{L \cdot l \cdot \omega}{4 \cdot A^2} \cdot \left[I_m (\underline{B}_1 - \underline{B}) \right] \cdot |\underline{B}_{\delta, y}|^2 \quad (3.7)$$

unde:

$$\underline{B}_1 = \frac{1}{\mu_0} \cdot \left(\sum_{\gamma} \sum_{\alpha} \frac{\underline{d}_A^* \cdot \underline{C}_A'^* \cdot s \gamma \cdot K_B^2 \cdot K_T^2}{\gamma^2 \cdot |\operatorname{sh} \lambda_0 \delta + \underline{C}_0' \cdot \operatorname{ch} \lambda_0 \delta|^2} \right)$$

$$\underline{B} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \left(\sum_{\gamma} \sum_{\alpha} \frac{\lambda_0 \cdot K_B^2 \cdot K_T^2 \cdot (\operatorname{ch} \lambda_0 \delta + \underline{C}_0' \cdot \operatorname{sh} \lambda_0 \delta)}{\gamma^2 \cdot (\operatorname{sh} \lambda_0 \delta + \underline{C}_0' \cdot \operatorname{ch} \lambda_0 \delta)} \right)$$

Rezultă forța longitudinală:

$$F_x = \frac{P_{mec}}{v} = \frac{P_{mec}}{2 \cdot \delta \cdot r (1-s)} \quad (3.8)$$

ca fiind funcție numai de dimensiunile geometrice, frecvență și alunecare.

Impunând forța longitudinală, implicit este impusă și suprafața dinapre întrefier a mașinii.

III.3. Pierderile active și reactive de putere în inductor.

Pierderile active în inductorul mașinii sînt:

- pierderile prin efect Joule-Lenz în înfășurări
- pierderile în fier
- pierderile suplimentare.

Pierderile prin efect Joule-Lenz în înfășurări sînt :

$$P_{cu} = m \cdot R_1 \cdot I_1^2 \quad (3.9)$$

unde:

$$R_1 = \frac{\rho_{cu} \cdot 2 \cdot p \cdot q \cdot N \cdot (4c + \tilde{h} \cdot \zeta)}{S}$$

$$S = I_1 / j_{cu}$$

Rezultă că relația (3.9) se mai poate pune sub forma:

$$\begin{aligned} P_{cu} &= \frac{2 \cdot m \cdot \rho_{cu} \cdot p \cdot q \cdot N \cdot (4c + \zeta \cdot \tilde{h}) \cdot j_{cu}}{I_1} \cdot I_1^2 = \\ &= \sqrt{2} \cdot m \cdot p \cdot q \cdot \rho_{cu} \cdot (4c + \zeta \cdot \tilde{h}) \cdot j_{cu} \cdot (N \cdot I_1 \sqrt{2}) = \\ &= \sqrt{2} \cdot m \cdot p \cdot q \cdot \rho_{cu} \cdot j_{cu} \cdot (4c + \zeta \cdot \tilde{h}) \cdot \frac{\tilde{h}^2 |B_{\delta}|}{8 \cdot \mu_0 \cdot A} \quad (3.10) \end{aligned}$$

Pierderile în fier se calculează folosind relația globală în care se ține seama de pierderile prin curenți turbionari și prin istereză [0 3] :

$$P_{Fe} = C \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,36} (B)^{1,71} \cdot M_{Fe} \quad (3.11)$$

unde: $C = 3,4 \text{ W/Kg}$ la $f = 10 + 500 \text{ Hz}$

B - inducția în fier

M_{Fe} - masa fierului

$$M_{Fe} = 7,85 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot p \cdot (h_j \cdot \zeta + h_c \cdot b_d \cdot q \cdot m) \cdot (2c) \cdot K_i$$

h_j, h_c, b_d - dimensiuni ale tolei (fig.3.2)

K_i - factor ce ține seama de izolația dintre tole $\approx 0,925$

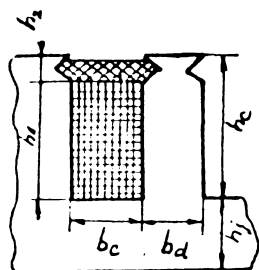


Fig.3.2. Dimensiunile tolei.

h_c - înălțimea creștăturii

h_j - înălțimea jugului

b_c - deschiderea creștăturii.

b_d - grosimea dintelui.

Pierderile suplimentare se admit 1% din puterea totală și sînt cele datorate pulsației superficiale:

$$P_s = 0,01 \cdot (P_a + P_{cu} + P_{Fe}) \quad (3.12)$$

Pierderile reactive de putere în inductor se calculează pe baza reactanței de dispersie a inductorului:

$$Q_x = m \cdot I_1^2 \cdot X_{\sigma} \quad (3.13)$$

unde:

$X_{\sigma} = \omega \cdot L_{\sigma}$ - reactanța de dispersie a inductorului

L_{σ} - inductivitatea de dispersie.

$$L_{\sigma} = L_{c\sigma} + L_{s\sigma} + L_o$$

$L_{c\sigma}$ - dispersia creștăturii și a capetelor de dinți

$L_{s\sigma}$ - dispersia capetelor de bobine

L_o - dispersia întrefierului.

Dar

$$L_{c\sigma} = 2 \cdot \mu_o \cdot (2c) \cdot 4p \cdot q \cdot N^2 \cdot (\lambda_c + \lambda_{cd}) \quad (3.14)$$

$$\lambda_c = \frac{h_c + 2 \cdot h_j}{3 \cdot b_c} - \text{permeanța de calcul a creștăturii ;}$$

$$\lambda_{cd} = \frac{5 \cdot \delta}{10 \cdot b_c + 4 \cdot \delta} - \text{permeanța de calcul a capetelor de dinți ;}$$

$$I_{\text{GV}} = \mu_0 \cdot (\zeta \cdot \tilde{N}/2) \cdot 4p \cdot q^2 \cdot \lambda_B \cdot N^2 \quad (3.15)$$

$\lambda_B \approx 0.3$ - permeanța de calcul a capetelor de bobină

$$L_o = \tilde{V}_o \cdot L_{1h} \quad (3.16)$$

$$L_{1h} = \frac{m}{2} \cdot L_{11h} = 2 \cdot \frac{\mu_0}{\tilde{N}^2} \cdot m \cdot \frac{4 \cdot p \cdot q^2 \cdot (2c) \cdot \zeta \cdot N^2}{\delta} - \text{inductivitatea principală}$$

$$\tilde{V}_o = 0.00215 + \frac{0.10895}{q^2} - \frac{0.10497}{q^2} - \text{factorul de dispersie}$$

In final, pentru Q_x se obține:

$$Q_x = m \cdot (I_1 \cdot N \cdot \sqrt{2})^2 \cdot D_Q \cdot \omega \cdot \mu_0 \quad (3.17)$$

unde:

$$D_Q = 8 \cdot c \cdot p \cdot q \cdot (\lambda_c + \lambda_{cd}) + \tilde{N} \cdot \zeta \cdot p \cdot q^2 \cdot \lambda_B + \frac{8 \cdot p \cdot q^2 \cdot c \cdot m \cdot \zeta \cdot \tilde{V}_o}{\tilde{N}^2 \delta}$$

In funcție de inducția în întrefier, relația (3.17) devine.

$$Q_x = m \cdot \omega \cdot D_Q \cdot \frac{\tilde{N}^4 \left| \frac{B \delta \cdot y}{A} \right|^2}{64 \cdot \mu_0 \cdot A^2} \quad (3.18)$$

III.4. Masa inductorului : $\tilde{N} \cos \varphi$.

Inductorul M.L. este constituit din:

- pachetul de tole cu masa: M_{Fe}
- izolația dintre tole cu masa: $M_{iz} \cdot \text{tole}$
- înfășurările din cupru cu masa: M_{cu}
- izolația înfășurărilor cu masa: $M_{iz} \cdot \text{infășq.}$

Masa tolelor fără izolație:

$$M_{Fe} = 7,85 \cdot 10^3 (2p + 1) (h_j \cdot \zeta + h_c \cdot b_d \cdot q \cdot m) 2c \cdot K_1 \quad (3.19)$$

K_1 - factor de izolație la tole ($K_1 \approx 0.925$)

Masa izolației dintre tole:

$$M_{iz.tole} = 2 \cdot 10^3 \cdot (2p + 1) (h_j \cdot \zeta + h_c \cdot b_d \cdot q \cdot m) \cdot 2c(1 - K_1) \quad (3.20)$$

Masa conductoarelor de cupru:

$$M_{cu} = 8,89 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot h_c \cdot b_c \cdot p \cdot q \cdot m \cdot (4c + \tilde{\eta} \cdot \zeta) \cdot K_u \quad (3.21)$$

K_u - factorul de umplere al creștăturii ($K_u \approx 0.6$)

Masa izolației înfășurărilor:

$$M_{iz.infășg} = 2 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot h_c \cdot b_c \cdot p \cdot q \cdot m \cdot (4c + \tilde{\eta} \cdot \zeta) \cdot (1 - K_u) \quad (3.22)$$

Masa inductorului rezultă ca fiind:

$$M_{inductor} = M_{Fe} + M_{iz.tole} + M_{cu} + M_{iz.infășg} \quad (3.23)$$

Randamentul mașinii, avînd în vedere puterile, se scrie:

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_a + P_{cu} + P_{Fe} + P_s} \quad (3.24)$$

Factorul de putere:

$$\cos \varphi = \frac{P_a + P_{cu} + P_{Fe} + P_s}{\left| \underline{S} + jQ_x + P_{cu} + P_{Fe} + P_s \right|} \quad (3.25)$$

La fel ca și randamentul, este o funcție numai de dimensiunile geometrice ale mașinii, la valori date pentru alunecarea "S" și inducția $\left| \underline{B}_{\delta,y} \right|$.

Produsul $\eta \cdot \cos \varphi$ se exprimă, astfel, numai în funcție de dimensiunile geometrice ale mașinii, în condiții de funcționare precizate (alunecare, cîmp în întrefier).

Cap. IV.

CALCULUL F.L. FOLOSIND METODA STRATURILOR.

M.L. a fost propusă, îndeosebi, pentru propulsia vehiculelor de mare viteză. Pentru aceste vehicule o frinare eficientă poate fi obținută fie prin folosirea M.L. în regim de frână, fie folosind (frina liniară) F.L. alimentată în c.c., plasată la trenurile convenționale pe boghiurile de susținere. Acest mod de acționare nu este însoțit, bineînțeles, de nici un fel de uzură, aceasta permițând considerarea utilizării sale în limite largi.

Rezultatele experimentale obținute la încercările efectuate de către S.N.C.F. (Franța) pe căile ferate cu infrastructura actuală, [W6], [P9] au demonstrat faptul că o frinare obținută folosind F.L., este de 4 ori mai eficientă ca o frinare cu saboți și de 5 ori față de frinarea rezistivă a motoarelor de tracțiune, la o viteză de 150 Km/h.

În [W6], [P9] sînt date doar rezultatele experimentale, o teorie cuprinzătoare și utilă, în acest domeniu, neexistînd.

IV.1. Teoria F.L. cu excitația în c.c.

Teoria expusă reușește, bazîndu-se pe ecuațiile lui Maxwell și folosind seriile duble Fourier pentru descompunerea potențialului inductorului, să stabilească performanțele unei F.L. alimentată în c.c. și indușul fiind gîna de cale ferată. (indus masiv feromagnetic). Se folosește metoda straturilor, în rezolvarea ecuațiilor de câmp. Permeabilitățile straturilor se determină printr-un procedeu iterativ de subrelaxare.

Fenomene specifice.

În fig.4.1. este arătată o F.L. cu poli aparenti și indușul gîna de rulare. Inductorul F.L. este format din poli aparenti (sau înecați) cu bobinele de excitație alimentate în c.c., alternînd ca polaritate.

Efectul longitudinal și cel transversal apar în mod analog ca la M.L. Indușul, din fier masiv, se saturează și aceasta duce la o redistribuție a curentului (efectul pelicular).

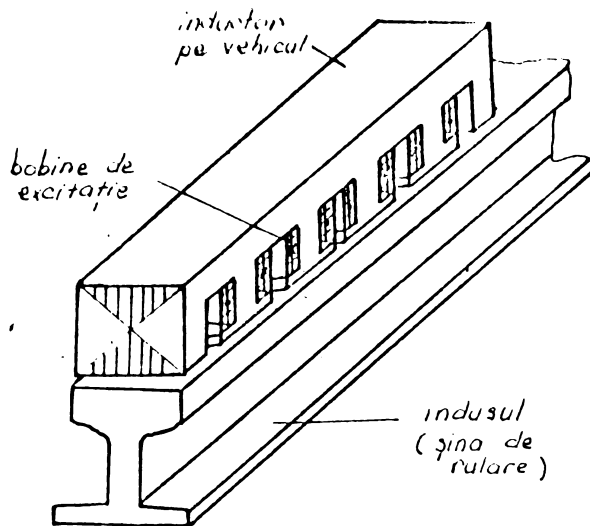


Fig.4.1. Frână liniară avînd ca indus șina de cale ferată.

Tratarea simultană a acestor fenomene, la considerarea curbei reale de magnetizare, se poate rezolva numai printr-o metodă numerică tridimensională cu un timp de calcul pe ordinator, exagerat de mare.

Cu o precizie rezonabilă (1%), metoda propusă, prin utilizarea seriilor duble Fourier rezolvă calculul F.L. prin considerarea simultană a efectului transversal, de refulare și a saturației.

Ipotezele de calcul sînt aceleași cu cele de la § II.3.

În plus, la calculul F.L. se neglijează efectul longitudinal și se analizează cazul în care inductorul are lățimea egală cu cea a indusului.

Modelul matematic.

Sistemul de coordonare se dă în fig.4.2, este fix față de indus și mobil față de inductor.

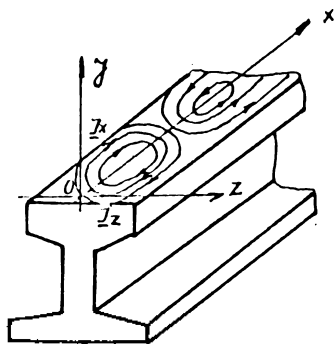


Fig.4.2. Sistemul de coordonate.

J_x - componenta inutilă (de întoarcere) a densității de curent în indus

J_z - componenta utilă (dă forța de frinare).

In fig.4.3. se dă repartiția solenației inductoare pe lungime și pe lățime.

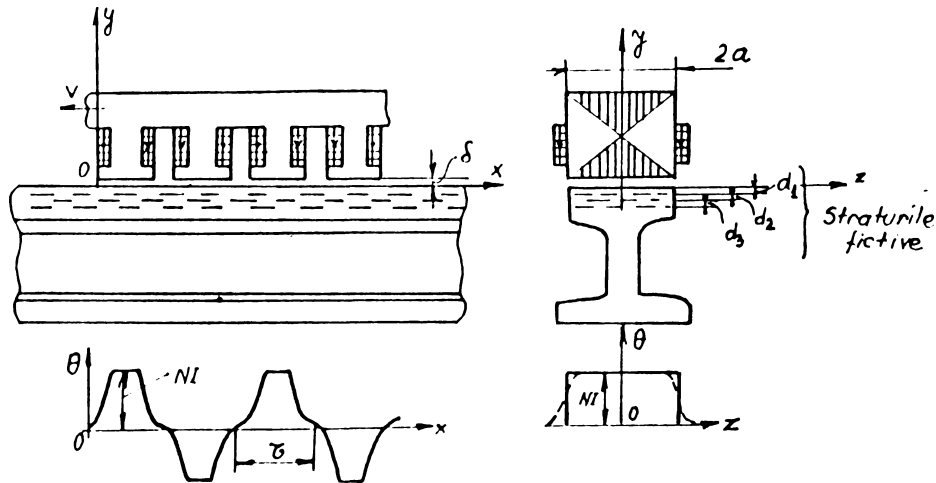


Fig.4.3. Modelul matematic.

In direcție transversală semi-perioada este chiar lățimea ginei de rulare deși cimpul magnetic nu se stinge brusc la marginea indusului. Aproximarea aceasta e necesară deoarece componenta transversală J_z a densității de curent în indus se anulează la $z = \pm a$.

Solenația inductoare descompusă în serii duble Fourier, față de indus, se scrie:

$$\underline{\theta}_{\gamma, n} = \sum_{\gamma} \sum_n \Lambda_{\gamma n} \cdot e^{j \frac{\gamma \tilde{\pi}}{\tau} (x + vt)} \cdot \cos \frac{n \tilde{\pi}}{2a} z \quad (4.1)$$

unde

$$\Lambda_{\gamma} = \frac{2}{\tilde{\pi}} \int_0^{\tilde{\tau}} \theta(x) \cdot \sin \frac{\gamma \tilde{\pi}}{\tau} x \left(\frac{\tilde{\tau}}{\tau} dx \right) = \frac{2}{\tilde{\pi}} \left[\int_0^{\frac{c-b}{2}} (NI \cdot \frac{x}{(c-b)/2}) \cdot \sin \frac{\gamma \tilde{\pi}}{\tau} x \left(\frac{\tilde{\pi}}{\tau} dx \right) + \int_{(c-b)/2}^c NI \cdot \sin \frac{\gamma \tilde{\pi}}{\tau} x \left(\frac{\tilde{\tau}}{\tau} dx \right) + \int_{(c+b)/2}^c NI \cdot \frac{x-c}{-(c-b)/2} \cdot \sin \frac{\gamma \tilde{\pi}}{\tau} x \left(\frac{\tilde{\pi}}{\tau} dx \right) \right] =$$

$$= \frac{8(NI) \cdot \tilde{\tau}}{(\tilde{\pi})^2 \cdot (c-b)} \cdot \sin \frac{\gamma \tilde{\pi}}{2} \cos \frac{\gamma \tilde{\pi} b}{2 \tau} \quad (4.2)$$

$$A_n = \frac{2}{\pi} \int_{-a}^a \cos \frac{n\tilde{z}}{2a} \cdot z \left(\frac{\tilde{r}}{2a} dz \right) = \frac{4}{n\tilde{r}} \sin \frac{n\tilde{r}}{2} \quad (4.3)$$

$$A_{jn} = A_j \cdot A_n = \frac{32(NI) \zeta}{\tilde{r}^3 \cdot y^2 \cdot n \cdot (c-b)} \cdot \sin \frac{j\tilde{r}}{2} \sin \frac{n\tilde{r}}{2} \cos \frac{j\tilde{r}b}{2\zeta} \quad (4.4)$$

v - viteza inductorului față de indus

ζ - pasul polar (fig.4.3)

$j = 1, 3, 5, \dots$; $n = 1, 3, 5, \dots$

Ecuatiile de cimp

Bazindu-ne pe ipoteza c), de la § II.3, potențialul magnetic vector are numai 2 componente A_x și A_z (deoarece $E = -\text{grad} \phi - \dot{\underline{A}}$ și $E_y = 0$).

Din ecuațiile lui Maxwell rezultă
- pentru întrefier ($0 \leq y \leq \delta$)

$$\begin{aligned} \Delta \underline{A}_\delta &= 0 \\ \text{div} \underline{A}_\delta &= 0 \end{aligned} \quad (4.5)$$

- pentru stratul " i " al indusului ($\delta + \sum_1^{i-1} d_i \leq y < \delta + \sum_1^i d_i$)

$$\begin{aligned} \Delta \underline{A}_i &= \sigma \cdot \mu_i \cdot \frac{\partial \underline{A}_i}{\partial t} \\ \text{div} \underline{A}_i &= 0 \end{aligned} \quad (4.6)$$

Pentru cele m straturi, în care se consideră divizat indusul, se obțin m ecuații de forma (4.6).

Numărul de straturi m influențează precizia rezultatelor fiind de dorit, din acest punct de vedere, un număr cât mai mare; pe de altă parte timpul de calcul crește mult cu mărirea lui m astfel că în programul de calcul s-a ales $m = 3$. Relațiile de calcul sînt stabilite pentru cazul general: n straturi.

Pe baze relației (4.1) soluțiile ecuațiilor (4.5) se pun, prin metoda separării variabilelor, sub forma:

$$\underline{A}_{\delta, z} = \sum_{\gamma} \sum_n \underline{C}_0 \cdot e^{j \frac{\gamma \tilde{r}}{\zeta} (x+vt)} \cdot \cos \frac{n \tilde{r}}{2a} \cdot z \cdot (\operatorname{ch} \lambda_0 y + \underline{C}'_0 \cdot \operatorname{sh} \lambda_0 y) \quad (4.7)$$

$$\underline{A}_{\delta, x} = \sum_{\gamma} \sum_n (-j) \frac{\zeta \cdot n}{2 \cdot a \cdot \gamma} \cdot \underline{C}_0 \cdot e^{j \frac{\gamma \tilde{r}}{\zeta} (x+vt)} \cdot \sin \frac{n \tilde{r}}{2a} \cdot z \cdot (\operatorname{ch} \lambda_0 y + \underline{C}'_0 \cdot \operatorname{sh} \lambda_0 y) \quad (4.8)$$

unde

$$\lambda_0 = \left(\frac{\gamma \tilde{r}}{\zeta} \right)^2 + \left(\frac{n \tilde{r}}{2a} \right)^2$$

In mod similar se scrie și potențialul magnetic vector pentru stratul "i".

$$\underline{A}_{i, z} = \sum_{\gamma} \sum_n \underline{C}_i \cdot e^{j \frac{\gamma \tilde{r}}{\zeta} (x + vt)} \cdot \cos \frac{n \tilde{r}}{2a} z \cdot (\operatorname{ch} \underline{\lambda}_i (y + \sum_{i=1}^{i-1} d_i) + \underline{C}'_i \cdot \operatorname{sh} \underline{\lambda}_i (y + \sum_{i=1}^{i-1} d_i)) \quad (4.9)$$

$$\underline{A}_{i, x} = \sum_{\gamma} \sum_n (-j) \cdot \frac{\zeta \cdot n}{2 \cdot a \cdot \gamma} \cdot \underline{C}_i \cdot e^{j \frac{\gamma \tilde{r}}{\zeta} (x + vt)} \cdot \sin \frac{n \tilde{r}}{2a} z \cdot (\operatorname{ch} \underline{\lambda}_i (y + \sum_{i=1}^{i-1} d_i) + \underline{C}'_i \cdot \operatorname{sh} \underline{\lambda}_i (y + \sum_{i=1}^{i-1} d_i)) \quad (4.10)$$

unde

$$\underline{\lambda}_i = \lambda_0^2 + j \zeta \cdot \mu_i \cdot \gamma \cdot \frac{\gamma \tilde{r}}{\zeta}$$

μ_i - permeabilitatea stratului i
 ζ - conductivitatea stratului i .

Pentru ultimul strat, componentele potențialului magnetic vector sînt:

$$\underline{A}_{u, z} = \sum_{\gamma} \sum_n \underline{C}_u \cdot e^{j \frac{\gamma \tilde{r}}{\zeta} (x + vt)} \cdot \cos \frac{n \tilde{r}}{2a} z \cdot e^{\underline{\lambda}_u (y + \sum_{i=1}^{i-1} d_i)} \quad (4.11)$$

$$\underline{A}_{u, x} = \sum_{\gamma} \sum_n (-j) \cdot \frac{\zeta \cdot n}{2 \cdot a \cdot \gamma} \cdot \underline{C}_u \cdot e^{j \frac{\gamma \tilde{r}}{\zeta} (x + vt)} \cdot \sin \frac{n \tilde{r}}{2a} z \cdot e^{\underline{\lambda}_u (y + \sum_{i=1}^{i-1} d_i)} \quad (4.12)$$

Condițiile la limită.

Pe baza continuității componentelor tangențiale ale intensității câmpului magnetic rezultă u + 1 ecuații, iar din condițiile de continuitate ale componentelor normale ale inducției magnetice obținem u ecuații și, deci, în final avem 2 u + 1 ecuații cu tot atâtea necunoscute.

Expresiile sînt analoge cu relațiile (2.33 + 2.37) și conduc la un sistem de ecuații de forma (2.38 + 2.42) cu prima ecuație (2.38) modificată sub forma:

$$\underline{C}_0 (\text{sh} \lambda_0 \delta + \underline{C}'_0 \cdot \text{ch} \lambda_0 \delta) = j \frac{\sqrt{\mu} \mu_0}{\zeta \lambda_0} A_{jn} \quad (4.13)$$

Din rezolvarea sistemului se obțin constantele \underline{C}_i , \underline{C}'_j sub forma expresiilor (2.43 + 2.47), singura modificare intervenind la ecuația (2.45), care pe baza ecuației (4.13) devine:

$$\underline{C}_0 = \frac{j \gamma \cdot \tilde{\mu} \cdot \mu_0 \cdot A_{jn}}{\zeta \cdot \lambda_0 \cdot (\text{sh} \lambda_0 \delta + \underline{C}'_0 \cdot \text{ch} \lambda_0 \delta)} \quad (4.14)$$

Inducția magnetică. Densitatea de curent.

Pe baza potențialului magnetic vector rezultă câmpul magnetic:

- în întrefier

$$\underline{H}_{\delta, y} = -j \sum_{\gamma} \sum_n \frac{\zeta}{\gamma} \cdot \lambda_0^2 \cdot \underline{C}_0 \cdot \cos \frac{n\tilde{\mu}}{2a} z \cdot e^{j\gamma\tilde{\mu}/\zeta(x+vt)} \cdot (\text{ch} \lambda_0 y + \underline{C}'_0 \cdot \text{sh} \lambda_0 y) \quad (4.15)$$

$$\underline{H}_{\delta, x} = \sum_{\gamma} \sum_n \underline{C}_0 \cdot \lambda_0 \cdot \cos \frac{n\tilde{\mu}}{2a} z \cdot e^{j\gamma\tilde{\mu}/\zeta(x+vt)} \cdot (\text{sh} \lambda_0 y + \underline{C}'_0 \cdot \text{ch} \lambda_0 y) \quad (4.16)$$

$$\underline{H}_{\delta, z} = \frac{j \zeta}{2a} \cdot \sum_{\gamma} \sum_n \frac{\underline{C}_0 \cdot n \cdot \lambda_0}{\gamma} \sin \frac{n\tilde{\mu}}{2a} z \cdot e^{j\gamma\tilde{\mu}/\zeta(x+vt)} \cdot (\text{sh} \lambda_0 y + \underline{C}'_0 \cdot \text{ch} \lambda_0 y) \quad (4.17)$$

- în indus:

$$\underline{B}_{i,y} = -j \sum_{\nu} \sum_n \frac{\zeta}{\pi \nu} \cdot \lambda_0^2 \cdot \underline{C}_i \cdot \cos \frac{n\tilde{\pi}}{2a} z \cdot e^{j(x+vt)\tilde{\nu}\pi/\zeta} \cdot \left(\text{ch } \underline{\lambda}_i \cdot \left(y + \sum_{i=1}^{i-1} di \right) + \underline{C}'_i \cdot \text{sh } \underline{\lambda}_i \cdot \left(y + \sum_{i=1}^{i-1} di \right) \right) \quad (4.18)$$

$$\underline{B}_{i,x} = \sum_{\nu} \sum_n \underline{C}_i \cdot \underline{\lambda}_i \cdot \cos \frac{n\tilde{\pi}}{2a} z \cdot e^{j(x+vt)\tilde{\nu}\pi/\zeta} \cdot \left(\text{sh } \underline{\lambda}_i \left(y + \sum_{i=1}^{i-1} di \right) + \underline{C}'_i \cdot \text{ch } \underline{\lambda}_i \cdot \left(y + \sum_{i=1}^{i-1} di \right) \right) \quad (4.19)$$

$$\underline{B}_{i,z} = j \frac{\zeta}{2a} \sum_{\nu} \sum_n \frac{\underline{C}_i \cdot n \cdot \underline{\lambda}_i}{\nu} \cdot \sin \frac{n\tilde{\pi}}{2a} z \cdot e^{j(x+vt)\tilde{\nu}\pi/\zeta} \cdot \left(\text{sh } \underline{\lambda}_i \left(y + \sum_{i=1}^{i-1} di \right) + \underline{C}'_i \cdot \text{ch } \underline{\lambda}_i \cdot \left(y + \sum_{i=1}^{i-1} di \right) \right) \quad (4.20)$$

Considerând $\underline{C}'_i = 1$ relațiile sînt valabile și pentru ultimul strat.

Din $\underline{j} = -\sigma \frac{\partial \underline{A}}{\partial t}$ se obțin densitățile de curenți

Determinarea permeabilităților straturilor se face pe baza metodei prezentate la paragraful II.8.

Organigrama principală a programului de calcul este dată în fig. 4.4.

Calculul forțelor.

Forța de frinare și cea normală rezultă, folosind tenzorul lui Maxwell, absolut analog ca la cap.II.5. Se obțin aceleași expresii (2.61), (2.64).

În cazul F.L., forța de frinare, se poate determina avînd în vedere puterea disipată în secundar care este:

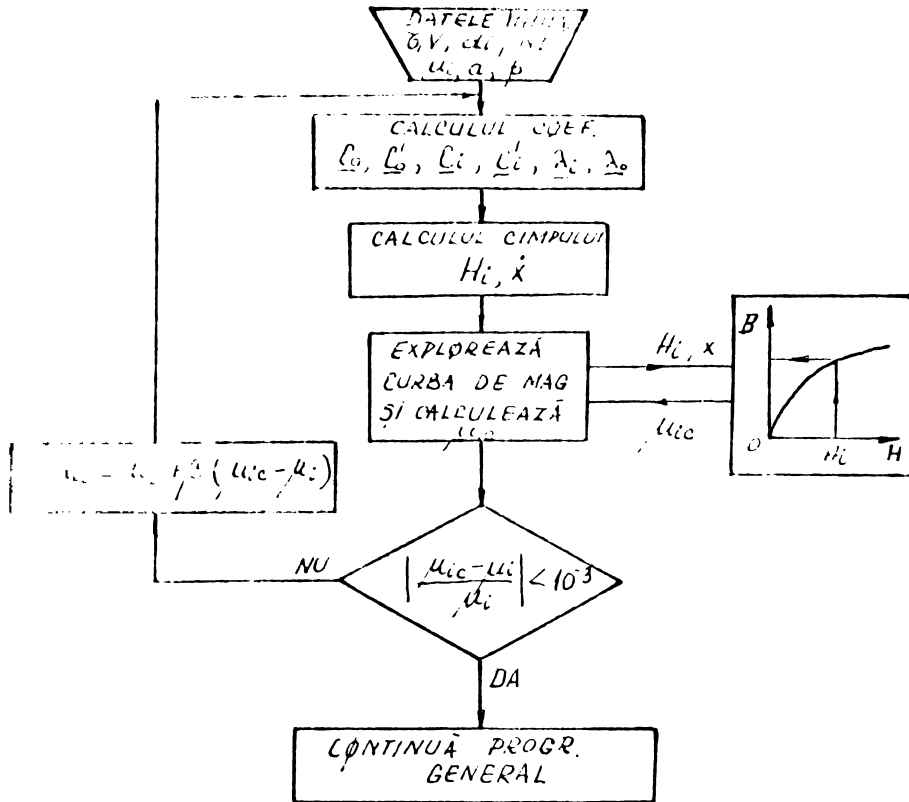


Fig.4.4. Schema principală a programului de calcul.

$$\begin{aligned}
 P &= \sum_{i=1}^u \left[\sum_{\nu} \sum_n \int_0^{2p\delta} \int_{-a}^a dx \int_{\gamma=-\sum_{l=1}^i d_l}^{\gamma=-\sum_{l=1}^i d_l} dz \int_{\gamma=-\sum_{l=1}^i d_l}^{\gamma=-\sum_{l=1}^i d_l} \left(|J_{x1}|^2 + |J_{z1}|^2 \right) \frac{dy}{\delta} \right] = \\
 &= \sum_{i=1}^u 2 \cdot p \cdot \delta \cdot a \cdot \delta \cdot v^2 \cdot \sum_{\nu} \sum_n |C_i|^2 \lambda_0^2 \cdot \left[\frac{\sin 2\lambda_{im} \cdot d_i}{4 \cdot \lambda_{im}} \right. \\
 &\quad \left. \left(|C'_i|^2 - 1 \right) - \frac{\text{sh } 2\lambda_{ir} \cdot d_i}{4 \cdot \lambda_{ir}} \cdot \left(|C'_i|^2 + 1 \right) + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{C_{ir} \cdot (\text{ch } 2\lambda_{ir} \cdot d_i - 1)}{2 \cdot \lambda_{ir}} + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{C'_{im} (\cos 2\lambda_{im} \cdot d_i - 1)}{2 \cdot \lambda_{im}} \right] \quad (4.21)
 \end{aligned}$$

In final, forța de frînare F_x , are expresia :

$$F_x = P/V \quad (4.22)$$

In fig. 4.5. se prezintă variația forței de frînare cu solenația, la frîna model experimentată de către S.N.C.F.

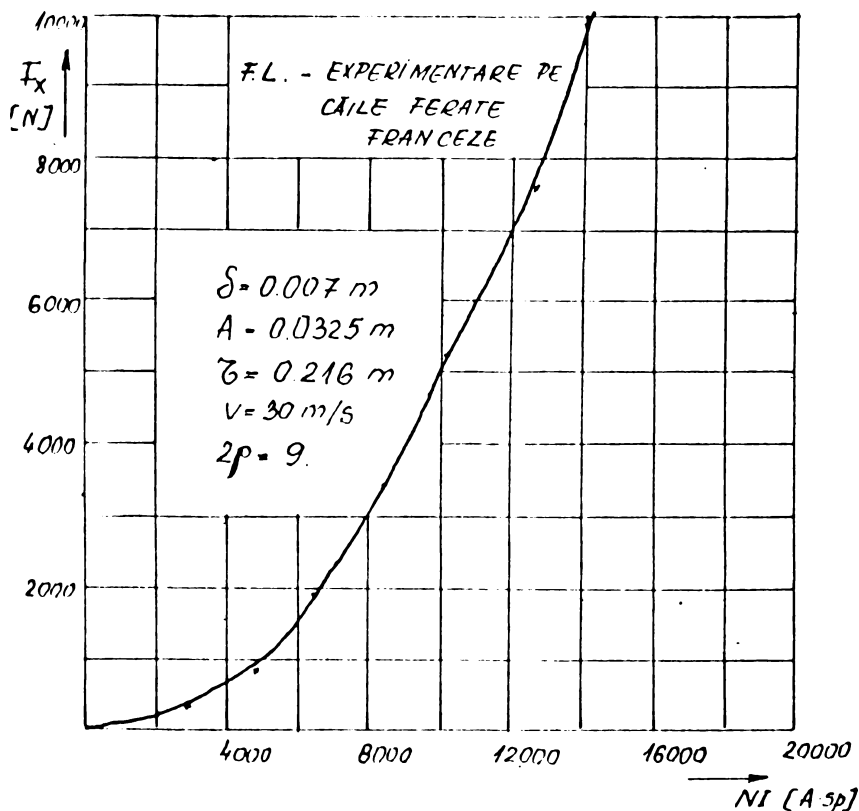


Fig.4.5. Forța de frînare în funcție de solenație la ($v = 30 \text{ m/s} = \text{ct.}$) viteză constantă.

La o anumită viteză, forța de frînare se poate modifica în limite largi prin valoarea curentului de excitație (fig.4.5).

In continuare se prezintă variația permeabilităților magnetice cu solenația de excitație a frinei (fig.4.6) și cu adâncimea de pătrundere a cîmpului în indușul masiv feromagnetic (fig.4.7).

Din curbele date este evidentă schimbarea importantă a valorii permeabilității magnetice a indușului atât cu solicitările magnetice (mărimea solenației de excitație a F.L.), cit și cu adâncimea de pătrundere, la o solicitare magnetică dată.

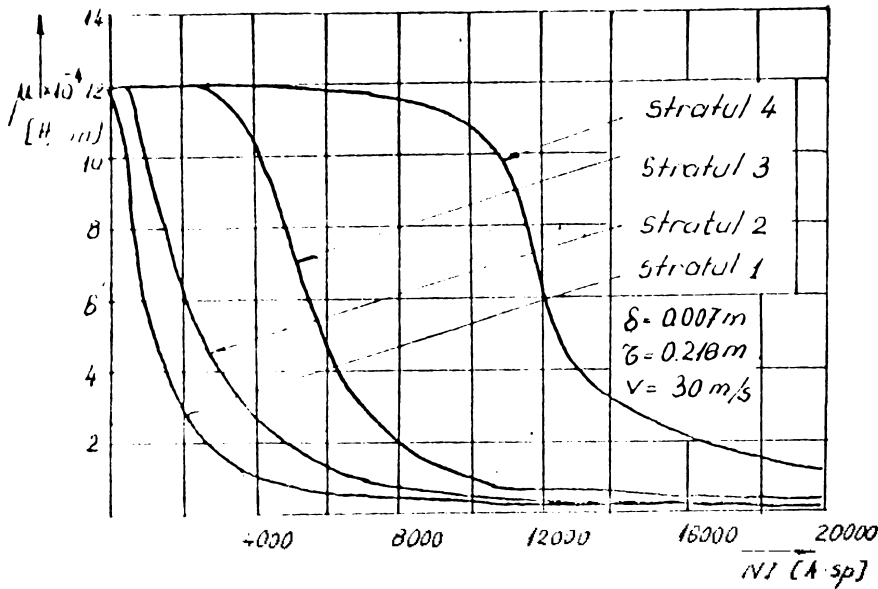


Fig.4.6.
Modificarea permeabilităților magnetice ale straturilor cu solenația de excitație, ($v = 30 m/s$).

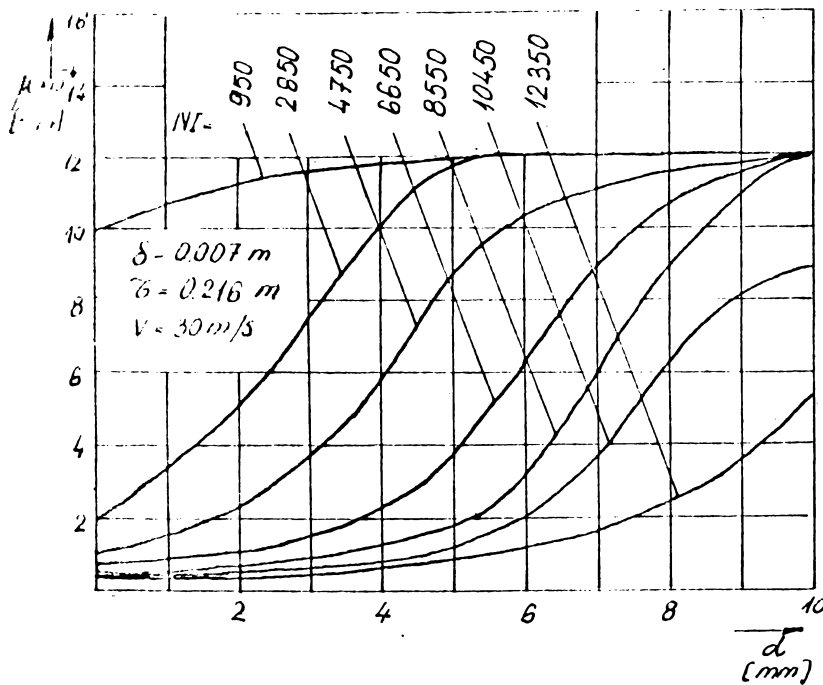


Fig.4.7.
Modificarea permeabilității magnetice cu adâncimea de pătrundere. ($v = 30 m/s$.)

Așadar, din caracteristicile forței de frinare, se poate trage concluzia că o frinare normală de serviciu la trenurile de mare viteză, cu sau fără motor liniar, este pe deplin posibilă în structura actuală a căilor de rulare.

Teoria prezentată poate fi folosită direct la calculul frinelor rotative cu secundarul din fier masiv.

IV.2. Calculul optimal al frinelor liniare.

În proiectarea F.L. se pune problema determinării dimensiunilor geometrice, astfel ca funcționarea să fie optimă din anumite puncte de vedere.

Datele inițiale de la care se pornește calculul sînt:

F_x - forța de frînare impusă în funcționare, la

V_N - viteza de deplasare a indusului față de inductor.

Aceste mărimi sînt cele principale și sînt impuse din condițiile utilizării frinei.

La acest paragraf se face un calcul de dimensionare al F.L. folosite în transportul feroviar de mare viteză, domeniu în care la viteze de 300 + 500 Km/h sistemele clasice de frînare nu mai dau rezultate [W6].

IV.2.1. Criteriile optime de proiectare.

Datele inițiale considerate sînt următoarele:

- întrefierul mecanic în limitele $\delta = (7 + 12)$ mm
- lățimea indusului în intervalul $2a = (50 + 75)$ mm
(respectiv semiperioda seriei Fourier după lățime:
 $2a + (1 + 2) \delta$)
- lungimea inductorului: 1 m.

Se propun ca și criterii optime, coeficienții α și β definiți astfel:

- a) α - raportul dintre puterea maximă de frînare (la viteza V_N) către puterea disipată în inductor;
- b) β - raportul dintre forța maximă de frînare către masa inductorului;

În calculul optimal s-a considerat constantă inducția din întrefier ($B_{\delta,y}$) la suprafața indusului.

Din relația (4.15) s-a exprimat solenația inductoare în funcție de valoarea inducției, înlocuind factorul C_0 prin expresia (4.14), obținându-se în final:

$$N I = \left| B_{\delta,y=0} \right| \cdot B_0 \quad (4.23)$$

unde:

$$B_0 = \frac{\pi^3 \cdot (\zeta - b)}{\mu_0 \cdot \zeta \cdot 32 \cdot \left| \sum_{\gamma} \sum_n \frac{\lambda_0 \cdot \sin \frac{n\pi}{2} \cdot \cos \gamma \pi b / (2\zeta)}{\gamma^2 n \cdot (\operatorname{sh} \lambda \delta + \underline{C}_0' \cdot \operatorname{ch} \lambda \delta)} \right|} \quad (4.24)$$

ζ, b - dimensiuni geometrice ale inductorului (fig.4.8)

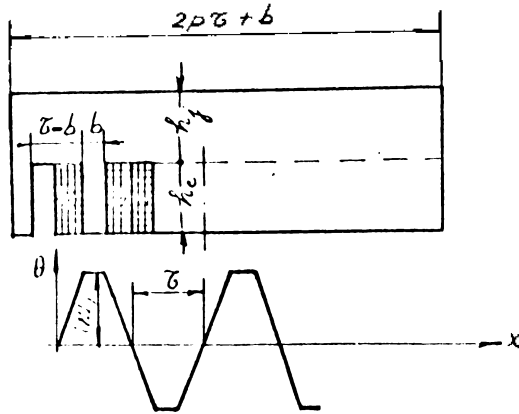


Fig.4.8. Frîna liniară

ζ - pas polar

b - lățimea dintelui

h_c - înălțimea creștăturii

h_j - înălțimea jugului

$$h_c = \frac{2 NI}{j_{cu} \cdot K_u \cdot (\zeta - b)}$$

Se observă că solenația de excitație este funcție explicită de dimensiunile geometrice ale mașinii, de câmpul magnetic din întrefier și prin urmare se poate calcula.

Deoarece

$$\underline{C}_1 = \underline{C}_0 = \frac{j \cdot \mu_0 \cdot 32 \cdot \left| \underline{B}_{\delta, y} \right| \cdot B_0 \cdot \sin \frac{\gamma \pi}{2} \sin \frac{n \pi}{2} \cos \frac{\gamma \pi b}{2 \zeta}}{\pi^2 \cdot \gamma \cdot n \cdot (\zeta - b) \cdot \lambda_0 \cdot (\operatorname{sh} \lambda \delta + \underline{C}_0' \cdot \operatorname{ch} \lambda \delta)} \quad (4.25)$$

și

$$\underline{C}_i = \underline{C}_{i-1} \cdot (\operatorname{ch} \lambda_{i-1} \cdot d_{i-1} - \underline{C}_{i-1}' \cdot \operatorname{sh} \lambda_{i-1} \cdot d_{i-1}) \quad (4.26)$$

rezultă că forța de frînare F_x (relația 4.22) se poate exprima în funcție de $\left| \underline{B}_{\delta, y=0} \right|$ și de dimensiunile geometrice ale frînei.

Rezistența înfășurării de excitație fiind:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} = \frac{\rho_{cu} \cdot (2a + \zeta) \cdot 2 \cdot N \cdot 2p}{I / j_{cu}}$$

expresia coeficientului α se prezintă sub forma:

$$\alpha = \frac{F_x \cdot V_N}{R \cdot I^2} = \frac{F_x \cdot V}{\rho_{cu} \cdot 4 \cdot (2a + \zeta) \cdot \left| \underline{B}_{\delta, y} \right| \cdot p \cdot j_{cu} \cdot B_0} \quad (4.27)$$

unde

$$\rho_{\text{cu}} = 0.0212 \cdot 10^{-6} \text{ } \Omega \cdot \text{m} \text{ (rezistivitatea electrică a cuprului)}$$
$$J_{\text{cu}} = \text{densitatea de curent } (6 + 9) \text{ A/mm}^2.$$

Similar, coeficientul β , este:

$$\beta = \frac{F \cdot x}{M} \quad (4.28)$$

unde: $M = M_{\text{Fe}} + M_{\text{cu}} + M_{\text{iz}}$

- masa fierului $M_{\text{Fe}} = [b \cdot h_c \cdot (2p+1) + h_j \cdot (2p \cdot \zeta + b)] \cdot 2a \cdot \gamma_{\text{Fe}}$

$$\gamma_{\text{Fe}} = 7,85 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$$

- masa cuprului $M_{\text{cu}} = h_c \cdot (\zeta - b) \cdot K_u \cdot 2p \cdot \gamma_{\text{cu}} \cdot (2a + \zeta)$

$$\gamma_{\text{cu}} = 8,89 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3; K_u - \text{factorul de umplere}$$

- masa izolației $M_{\text{iz}} = h_c \cdot (\zeta - b) \cdot (1 - K_u) \cdot 2p \cdot \gamma_{\text{iz}} \cdot (2a + \zeta)$

$$\gamma_{\text{iz}} = 2000 \text{ kg/m}^3.$$

Expresiile coeficienților de optim α, β (relațiile 4.27, 4.28) sînt funcții numai de cîmp și de dimensiunile geometrice.

Ca variabilă independentă se consideră pasul polar ζ , în $\left| \underline{B}_{\delta, \gamma} \right|$ ca parametru.

Folosind curbele $\alpha = f_1(\zeta)$ și $\beta = f_2(\zeta)$ se poate găsi în final valoarea optimă căutată pentru ζ .

IV.2.2. Exemplu numeric.

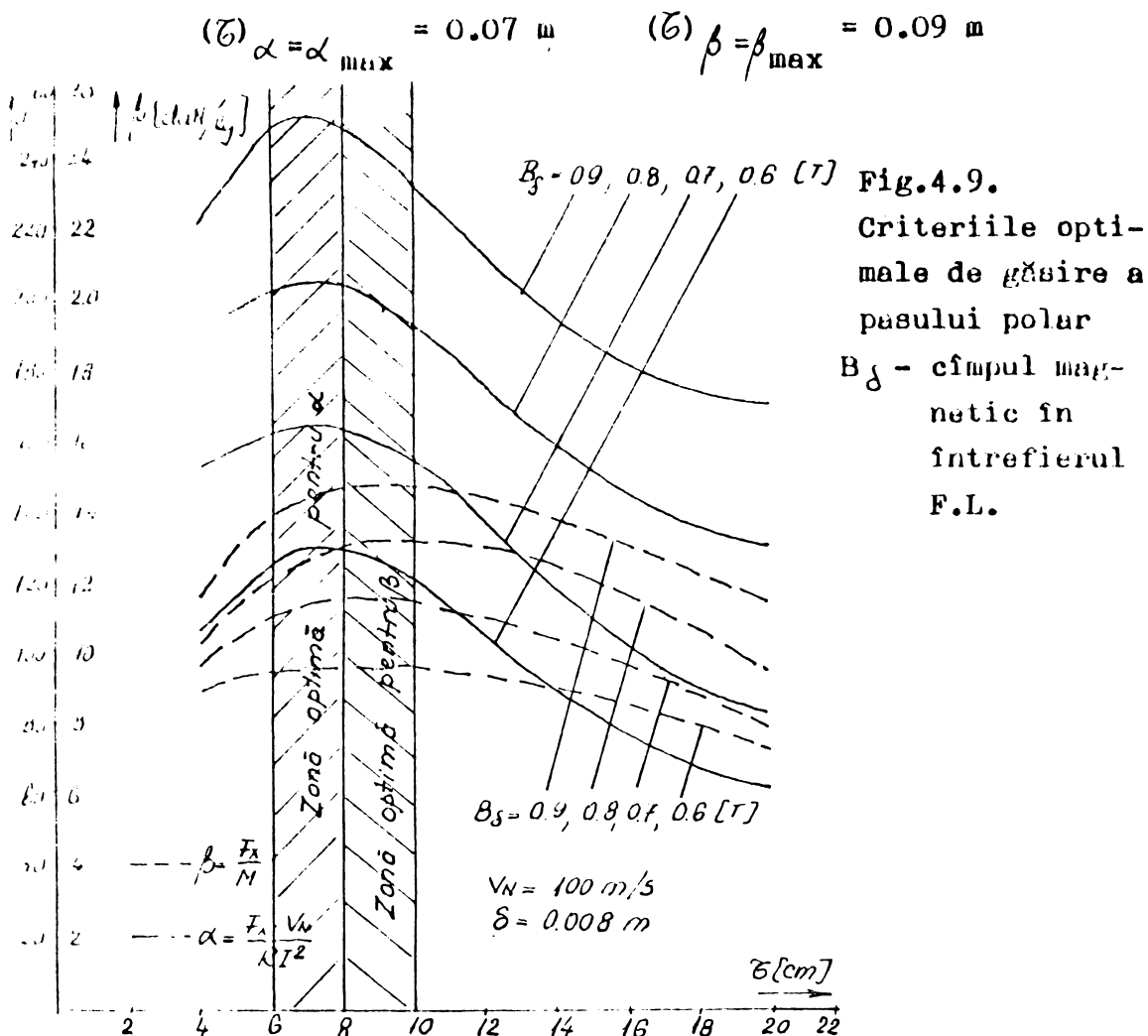
Se caută determinarea pasului polar optim la o F.L. ce funcționează la 100 m/a.

Datele inițiale sînt:

- lățimea ginei: $2a = 0.064 \text{ m}$

- întrefierul: $\delta = 0.008 \text{ m}$.

Rezultatele finale sînt reprezentate în fig. 4.9 și fig. 4.10.
Din fig. 4.9 se poate observa că pașii polari optimați găsiți
pentru criteriile α și β sînt diferiți:



Forța de frînare pe 1 m lungime și solenația pe pol sînt date
în fig. 4.10.

Se consideră, în continuare un pas polar de 0.008 m
și (la o inducție în întrefier de 0,7 T, la viteza de 100 m/s)
se determină variația forțelor (de frînare și atractive) cu
viteza. Solenația pe pol este constantă:

$$NI = 11140 \text{ A. sp/pol.}$$

Rezultatele sînt reprezentate în fig. 4.11.

Folosind ecuația 4.27 rezultă pentru pierderile de putere în infăgurările de excitație valoarea:

$$PI^2 = F \cdot V / \alpha = 10200 \cdot 100 / 163 = 6260 \text{ W} = 6,26 \text{ kW.}$$

Acest rezultat se poate considera extrem de favorabil.

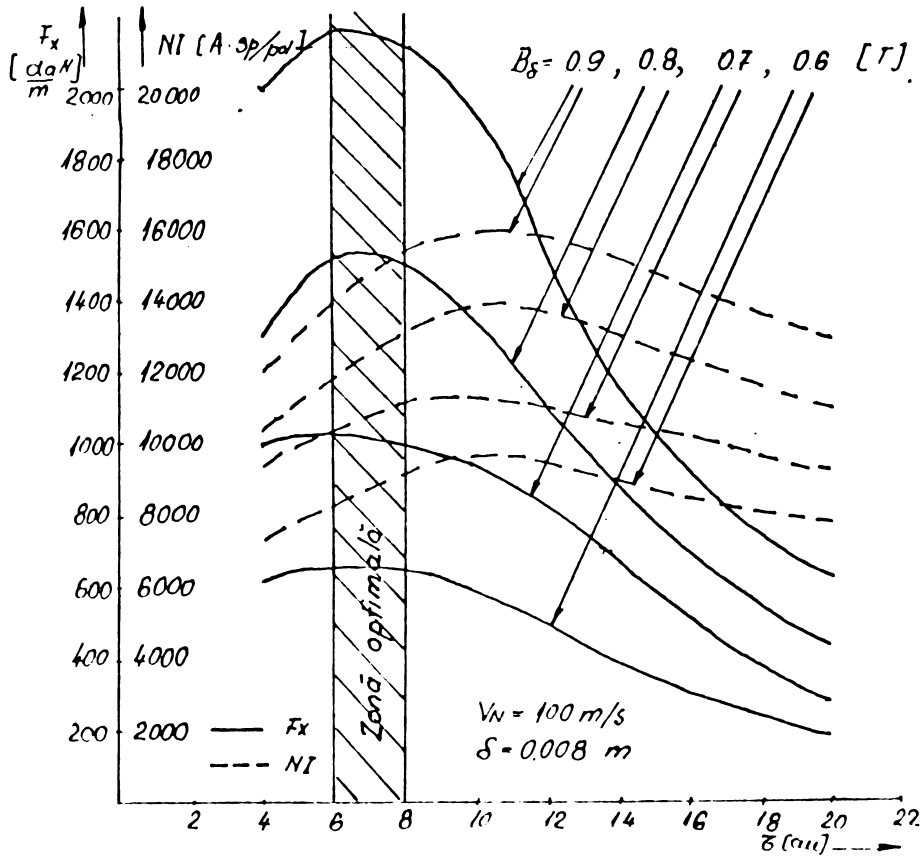


Fig.4.10. Forța de frinare/metru lungime și solenația pe pol.

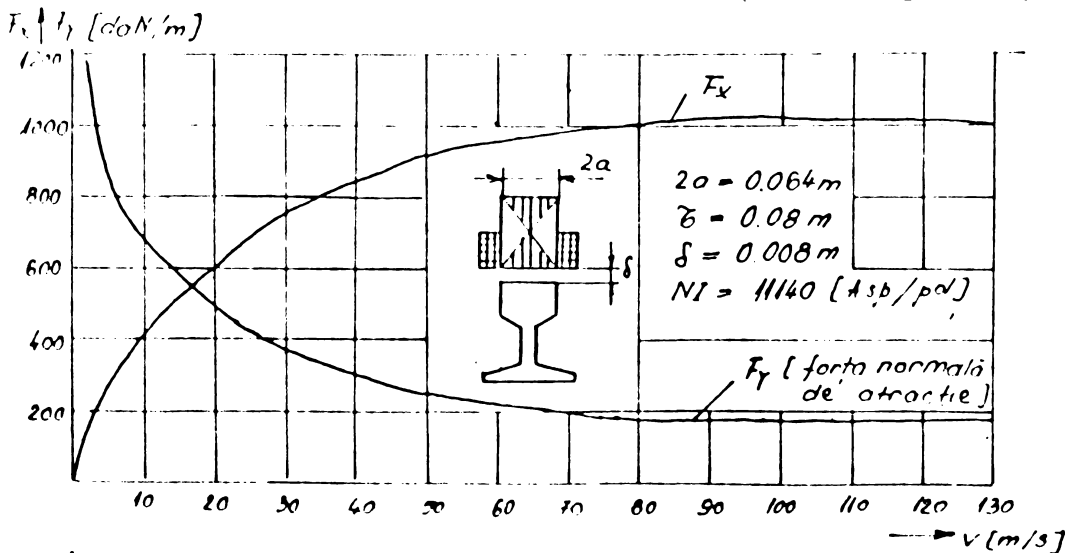


Fig.4.11. Forța de frinare și cea normală/metru lungime, în funcție de viteză.

Scăderea forței normale cu viteza este rezultatul curenților induși în ghină, care la fel ca și la M.L. au ca urmare apariția forței de levitație.

În zona vitezelor mari, datorită saturației materialului feromagnetic al indusului, forța de frinare crește puțin cu viteza, ca apoi să prezinte o tendință de scădere.

Programul de calcul este conceput folosind ordinograma:

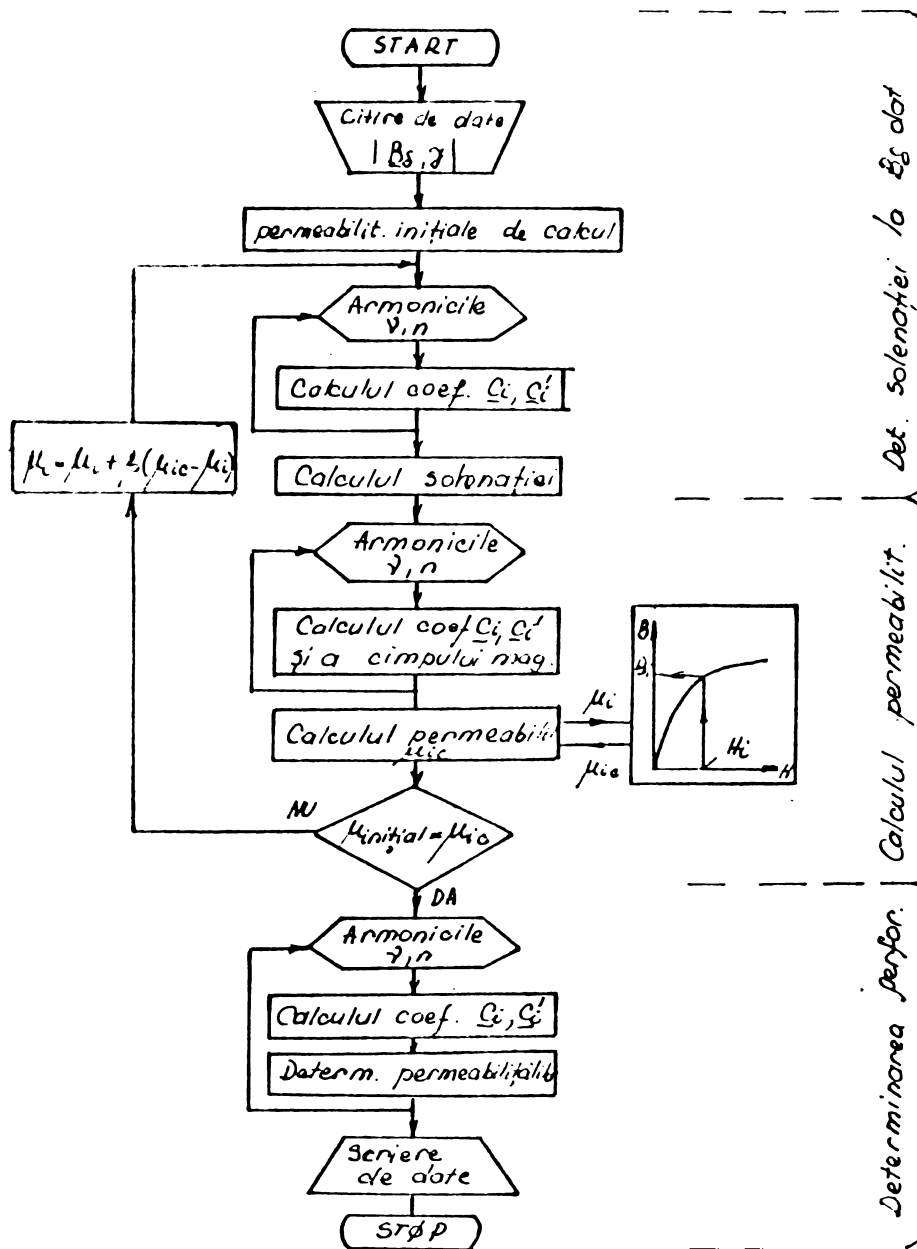


Fig.4.12. Programul folosit la proiectarea optimă.

Un listing al programului de calcul este dat în anexa 4.

Timpul de calcul pe un calculator FELIX C-256 este sub 20' pentru un coeficient de subrelaxare de $\beta = 0.9$.

In concluzie, teoria F.L. și calculul lor optimal oferă, pe baza programelor de calcul date în anexă, o cunoaștere completă a problemelor de proiectare și exploatare a F.L. excitate în curent continuu.

Cap.V.

METODE SIMPLIFICATE DE CALCUL A M.L.U.

În acest capitol se prezintă trei metode de calcul al performanțelor M.L.U.

Efectul longitudinal este neglijat și domeniul lor de aplicare este:

- la M.L. cu indus aluminiu pe fier sau numai fier masiv, cu un număr de perechi de poli $p > 2$, cu pași polari $\zeta \leq 0.10$ m și alunecări $S > 0.2$.

V.1. Calculul M.L.U. considerând ciclul de istereză al materialului inducției.

Considerarea isterezei, la materialele feromagnetice, este necesară având în vedere valoarea pierderilor prin istereză comparativ cu pierderile prin efect pelicular (pierderile prin efect pelicular/ pierderile prin istereză $\approx 0,6$). [N5].

Buclele de istereză se consideră în calcule printr-o elipsă echivalentă cu aria egală cu a buclei reale.

Funcțiile: $B(t)$, $H(t)$ se asimilează cu niște sinusoidale echivalente. Permeabilitatea magnetică a materialului feromagnetic se consideră sub forma ei complexă:

$$\underline{\mu} = \mu \cdot e^{-j\psi} \quad (5.1)$$

unde: $\mu = B_{1m}/H_{1m}$ $\left(\begin{array}{l} B_{1m} - \text{amplitudinea primei armonici a inducției} \\ H_{1m} - \text{amplitudinea primei armonici a cîmpului} \end{array} \right)$

$$\sin \psi = \frac{Wh}{\sqrt{T} \cdot B_{1m} \cdot H_{1m}} \quad (Wh - \text{pierderile prin istereză pe unitatea de volum})$$

Funcțiile μ, ψ , sînt variabile cu sollicitările magnetice și rezolvarea ecuațiilor lui Maxwell se face în două moduri:

- analitic
- numeric.

A. Calculul analitic.

Modelul matematic de calcul este unidimensional, efectul longitudinal fiind neglijat, iar efectul transversal este luat în considerare prin coeficienți de corecție [fig.5.1]

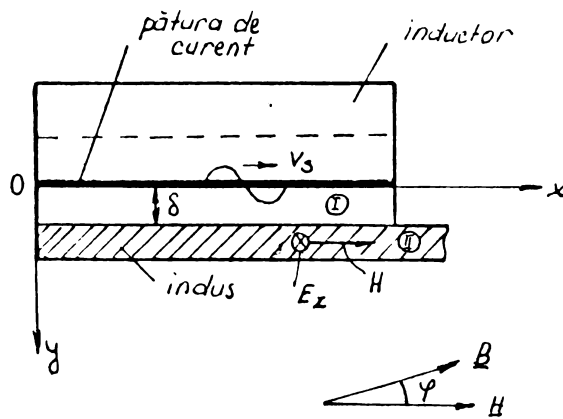


Fig.5.1. Modelul matematic

- δ - întrefierul
- v_s - viteza cîmpului de excitație
- H - cîmpul magnetic în indus
- E_z - cîmpul electric în indus.

Pentru permeabilitatea magnetică complexă μ se consideră o variație de forma:

$$\mu = \frac{\mu_e}{(1 - \frac{y}{y_K})^2} e^{-j\psi} \quad (5.2)$$

unde - y_K - adîncimea de pătrundere echivalentă (la $y = y_K$, vectorul lui Poyting este aproape nul și energia electromagnetică nu se propagă mai departe în materialul feromagnetic) - μ_e - valoarea permeabilității la suprafața mediului feromagnetic. Folosind concluziile din [N5], pentru y_K se găsește expresia:

$$y_K = \frac{1}{K} \left(\frac{3n+1}{n-1} \right) \cdot \frac{1}{2 \cdot \cos \psi} \sqrt{1 - \left(\frac{n-1}{3n+1} \right)^2 \cdot \cos^2 \psi} - \sin \psi$$

cu $\left\langle K = \sqrt{\frac{\omega^2 \cdot \mu_e \cdot \sigma_{Fe}}{2}} \right.$ (inversul adncimii de pătrundere
la $\mu = \mu_e = ct.$)

n - coeficient dedus experimental din curba de magnetizare aproximată prin $B = K_m \cdot H^{1/n}$.

Înzindu-ne pe relațiile de mai sus, ecuațiile lui Maxwell:

$$\text{rot } \underline{H} = \underline{J}$$

$$\text{rot } \underline{E} = - \frac{\partial \underline{B}}{\partial t}$$

conduc la următoarea ecuație diferențială:

$$\left(1 - \frac{y}{y_K}\right)^2 \cdot \frac{d^2 \underline{H}}{d y^2} = j \cdot 2 \cdot K^2 \cdot e^{-j\psi} \cdot \underline{H} \quad (5.3)$$

care are o soluție de forma:

$$\underline{H} = \underline{A}_1 \left(1 - \frac{y}{y_K}\right)^{\alpha_1} + \underline{A}_2 \left(1 - \frac{y}{y_K}\right)^{\alpha_2} \quad (5.4)$$

cu

$$\alpha_{1,2} = \frac{1}{2} \left(1 \pm \sqrt{1 + j8 K^2 \cdot y_K^2 \cdot e^{-j\psi}} \right) \quad (5.5)$$

$\underline{A}_1 = \underline{H}_0$ - cîmpul magnetic la suprafață

$\underline{A}_2 \approx 0$ - la cîmpuri puternice [N5] .

După transformări rezultă:

$$\underline{H} = \underline{H}_0 \left(1 - \frac{y}{y_K}\right)^{\alpha_1} \quad (5.6)$$

$$\underline{E} = \frac{\alpha_1}{\sigma_{Fe} \cdot y_K} \underline{H}_0 \left(1 - \frac{y}{y_K}\right)^{\alpha_1 - 1} \quad (5.7)$$

cu $\alpha_1 = \frac{2n}{n-1} \left(1 + j \sqrt{\frac{n+1}{2n} - \frac{(n-1)^2}{2n^2} \cdot K^2 \cdot y_K^2 \cdot \sin^2 \psi} \right)$ (5.8)

Cunoscînd cîmpul electric și cel magnetic impedanța de undă a mediului feromagnetic este cunoscută:

$$Z_2 = \left(\frac{E}{H} \right)_{y=0} = r_2 + jX_2 = \frac{\alpha_1}{\sigma_{Fe} \cdot y_K} \quad (5.9)$$

La oțelurile laminare plaja de variație a lui ψ este între 0° și 12° fiind funcție de aria buclei de istereză a materialului.

Pentru un anumit ψ se poate arăta că rezistența r_1 crește față de cazul $\psi = 0$ (cazul isterezei nule) și reacțanța X_1 scade, rezultând pentru $\operatorname{tg} \psi$ o valoare mai mică ca $\sqrt{\frac{n+1}{2n}}$, cît era la $\psi = 0$.

În calculele ingineresti, practice, pentru oțelul laminat se poate considera $n = 10$, rezultînd pentru r_1, X_1 , expresii simplificate:

$$\begin{aligned} r_2 &= \frac{K}{\sigma_{Fe}} \sqrt{2} \\ X_2 &= \frac{K}{\sigma_{Fe}} \cdot 0,85 \end{aligned} \quad \text{și deci } \operatorname{tg} \psi = 0,6 \begin{pmatrix} r_1 = |Z| \cos \psi \\ X_1 = |Z| \sin \psi \end{pmatrix} \quad (5.10)$$

Se observă că rezistența se mărește de $\sqrt{2}$ față de cazul $\mu = \text{ct}$, reacțanța micșorîndu-se de 0,85 ori, iar $\operatorname{tg} \psi$ se reduce de la 1 la 0,6,

Deoarece la mașinile electrice în general și la M.L. în special $8K^2 \cdot y_K^2 \gg 1$, relația (5.5) se poate simplifica și se obțin expresiile:

$$r_2 = \frac{4 n \cdot \sqrt{1 + \sin \psi}}{\sigma (3n + 1)} \cdot K \quad (5.11)$$

$$X_2 = \frac{\sqrt{1 - \sin \psi}}{\sigma} \cdot K \quad (5.12)$$

care sînt mai generale ca (5.10) dar mai particulare ca (5.9)

Influența lățimii finite (efectul transversal) asupra parametrilor indusului se consideră după $[Y_2]$, prin coeficientul K_2 , de mărire a impedanței secundare:

$$K_2 = \frac{\frac{2\pi b}{\zeta} (1 + \operatorname{cth} \frac{\pi \cdot b}{\zeta})}{\frac{2\pi b}{\zeta} (1 + \operatorname{cth} \frac{\pi \cdot b}{\zeta}) - 2} \quad (5.13)$$

unde: b - semilățimea indusului; ζ - pasul polar.

Impedanța secundară redusă la cea primară se obține prin înmulțirea lui \underline{Z} (rel.5.9) cu factorul K_z [P8]:

$$\underline{Z}'_2 = k_2 \cdot K_z \cdot \frac{\underline{Z}}{S} = k_2 \cdot K_z \cdot \frac{\alpha_1}{\sqrt{\sigma_{Fe} \cdot y_K \cdot S}} = \frac{r'_2(s)}{s} + j \frac{X'_2(s)}{s} \quad (5.14)$$

unde:

$$K_z = \frac{12 \cdot (N_1 \cdot K_{B1})^2 \cdot a}{p \cdot \zeta} \quad (5.15)$$

a - semilățimea inductorului

N_1 - numărul de spire pe fază (K_{B1} - factorul de

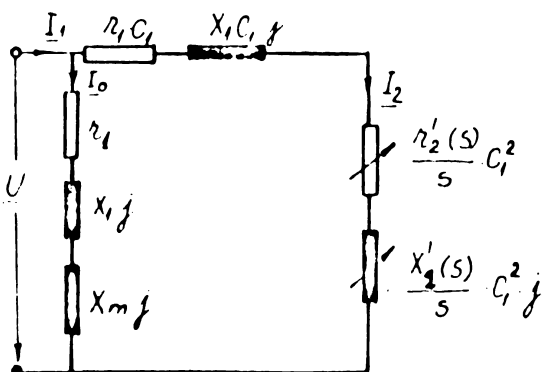
p - numărul perechilor de poli înfășurare)

S - alunecarea.

Parametrii indusului rezultă sub forma unor funcții de alunecare și de curentul primar.

Pe de altă parte însă, parametrii inductorului, \underline{Z}_1 , și ai circuitului de magnetizare, \underline{Z}_m , depind în foarte mică măsură de solicitările magnetice ale indusului, putându-se folosi o schemă electrică ca cea din fig. 5.2.

Determinarea lui \underline{Z}_1 , \underline{Z}_m , se face ca la o mașină asincronă obișnuită [D1].



$$C_1 \approx 1 + \frac{X_1}{X_m}$$

$$X_m = \frac{\mu_0 \cdot \omega_1 \cdot \zeta^2}{\pi^2 \cdot \delta'} \cdot K_z \quad (\text{impedanța de magnetizare})$$

Fig.5.2. Schema electrică echivalentă în "L" a M.L.

Din schema electrică a mașinii, rezultă curentul total absorbit:

$$I_1 = I_0 + I_2 = \frac{U}{r_1 + j(X_1 + X_m)} + \frac{U}{r_1 \cdot C_1 + (r_2'/s) \cdot C_1^2 + j(X_1 \cdot C_1 + (X_2'/s) \cdot C_1^2)} \quad (5.16)$$

Puterea activă electromagnetică ce trece în indus, folosind vectorul lui Poyting și relațiile (5.6)(5.7) pentru \underline{E} și \underline{H} se scrie sub forma:

$$P_u = \frac{1}{2} \operatorname{Re}[\underline{E} \cdot \underline{H}^*] 2p \zeta \cdot (2b) = 2 p \zeta \cdot b \cdot H_0^2 \cdot r_2 \cdot X_2 \quad (5.17)$$

În funcție de curentul I_2 , puterea activă secundară este:

$$P_s = 3 \cdot I_2^2 \cdot (r_2'/s \cdot C_1^2) \quad (5.18)$$

Din (5.17) și (5.18) rezultă legătura dintre I_2 și H_0 :

$$H_0 = I_2 \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot K_2 \cdot C_1^2}{2p \zeta \cdot b \cdot s}} = \beta \cdot I_2 \quad (5.19)$$

Pe de altă parte din (5.16) :

$$I_2 = \frac{U}{\sqrt{(r_1 \cdot C_1 + r_2'/s \cdot C_1^2)^2 + (X_1 \cdot C_1 + X_2'/s \cdot C_1^2)^2}} \quad (5.20)$$

Parametrii secundari $r_2'(s)$, $X_2'(s)$, la o alunecare dată, se pot calcula numai dacă se cunoaște μ_e , ceea ce presupune cunoașterea lui H_0 . Aceasta înseamnă considerarea relației (5.20) ca o ecuație implicită, care se rezolvă iterativ în modul următor: se alege H_0 , se calculează $\mu_e = B_0/H_0$; $r_2'(s)$, $X_2'(s)$ și astfel rezultă I_2 (rel.5.20) la o anumită valoare pentru U dată; calculul se reia, modificându-se H_0 , pînă ce se obține $I_2 = H_0/\beta$.

Se poate, astfel, trasa locul geometric al curentului, la tensiune la borne constantă, cunoscut sub numele de "diagrama cercului" (la mașina asincronă rotativă cu parametri secundari constanți).

După cum se observă din fig.5.3, la M.L. abaterea față de cerc este importantă și este cauzată de ponderea mări-

tă a efectului pelicular și a celui de saturație.

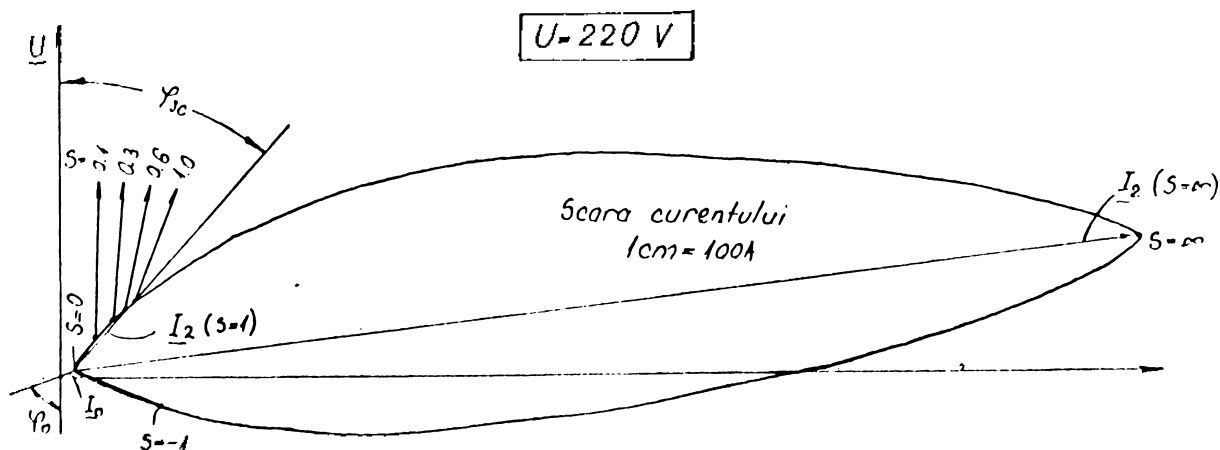


Fig. 5.3. Locul geometric al curentului de tensiune constantă.

Forma de variație, cu alunecarea, a parametrilor secundari ai mașinii $r_2'(s)/s$ și $X_2'(s)/s$, este dată în fig.5.4.

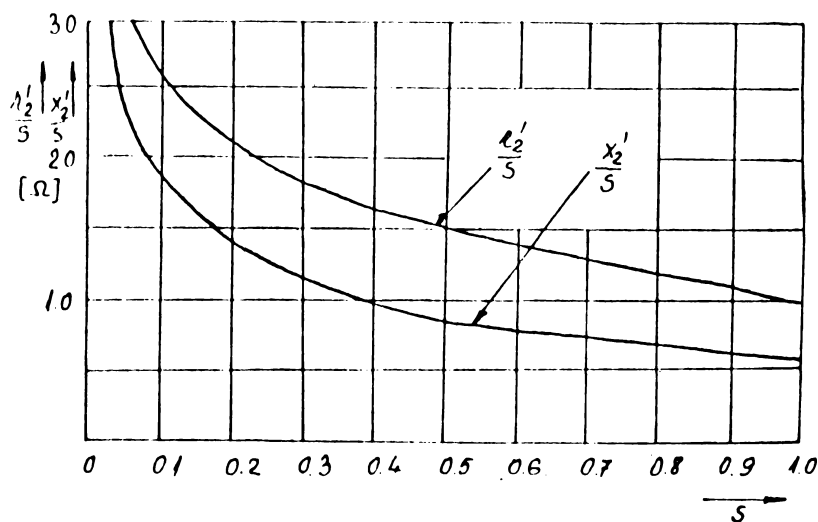


Fig.5.4. Modificarea parametrilor secundari r_2'/s , X_2'/s cu alunecarea s - alunecarea

INSTITUTUL POLITEHNIC
TIMIȘOARA
BIBLIOTECA CENTRALĂ

Curbele de mai sus au fost calculate pe M.L. (ML - 03-EPT), avînd datele:

$2a = 0.255$ m - lățimea inductorului;

$2c = 0.400$ m - lățimea indușului;

$N_1 = 72$ spire; $\delta = 0.25$ m; $p = 3$; $q = 3$; $\sigma_{Fe} = 3.3 \cdot 10^6 \frac{1}{\Omega \cdot m}$

$\delta = 7.8 \cdot 10^{-3}$ m - întrefierul real al mașinii.

$X_1 = 0.367 \Omega$
 $r_1 = 0.044 \Omega$ parametrii primari ; $X_m = 3.37 \Omega$ - reactanța de magnetizare.

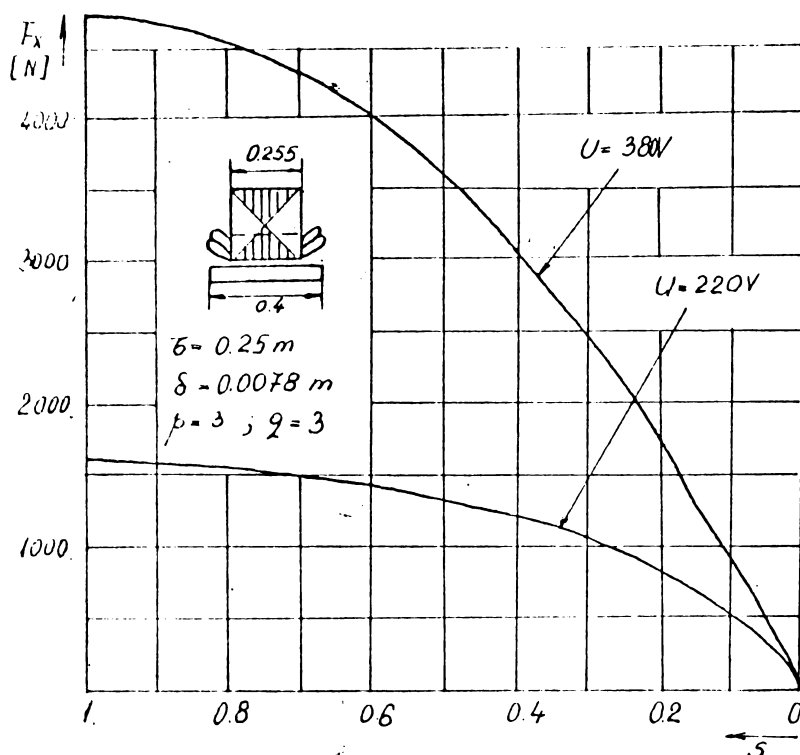


Fig.5.5. Caracteristica mecanică la tensiune constantă;

U = 220 V și

U = 380 V

B. Calculul numeric.

Rezolvarea ecuațiilor de câmp se face numeric folosind calculatorul.

Ecuația la care se ajunge pentru potențialul magnetic vector este cea mai generală și include ecuațiile scrise pentru câmp în cazurile particulare anterior tratate.

Modelul matematic de calcul unidimensional este dat în fig.5.1 și are la bază precizările făcute la cazul A.

Ecuațiile câmpului electromagnetic prin folosirea potențialului magnetic vector ($\underline{B} = \text{rot } \underline{A}$) și ținând seama că vectorul \underline{A} are o singură componentă după axa OZ, (deoarece $\underline{E} = -\frac{\partial \underline{A}}{\partial t}$) se scriu sub următoarele forme :

$$\text{rot}(\text{rot } \underline{A}) = 0 \text{ - pentru întrefier; } 0 \leq y \leq \delta;$$

$$\text{rot}\left(\frac{\text{rot } \underline{A}'}{\mu}\right) = \sigma \left(\frac{\partial \underline{A}'}{\partial t}\right) \text{ - pentru indus;}$$

$$\delta \leq y ;$$

Ecuația (5.21) - tip Laplace - se scrie sub formă explicită astfel:

$$\frac{d^2 \underline{A}}{dx^2} + \frac{d^2 \underline{A}}{dy^2} = 0 \quad (5.23)$$

și reprezintă ecuația cu derivate parțiale ce o satisface potențialul magnetic vector, \underline{A} , în întregul.

În ecuația (5.22) $\underline{\mu}$ este permeabilitatea magnetică complexă a materialului, obținută prin înlocuirea ciclului de histereză printr-o elipsă echivalentă.

Deoarece s-a neglijat efectul transversal ($E_y = 0$), potențialul magnetic vector este de forma: $\underline{A} = A(x, y, t) \cdot \underline{K}$ și folosind calculul în mărimi complexe, ecuația (5.22) se poate pune sub forma:

$$\text{grad} \frac{1}{\underline{\mu}} \times \text{rot} \underline{A}' + \frac{1}{\underline{\mu}} \cdot \text{rot rot} \underline{A}' = -j\sigma \cdot \omega \cdot \underline{A}' \quad (5.24)$$

sau

$$\text{grad} \frac{1}{\underline{\mu}} \times \text{rot} \underline{A}' + \frac{1}{\underline{\mu}} \cdot (-\Delta \underline{A}') = -j\sigma \cdot \omega \cdot \underline{A}' \quad (5.25)$$

$$\text{Fiindcă } \text{grad} \frac{1}{\underline{\mu}} = \bar{L} \cdot \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{\underline{\mu}} \right) + \bar{J} \cdot \frac{d}{dy} \left(\frac{1}{\underline{\mu}} \right) \text{ și}$$

$$\text{rot} \underline{A}' = \bar{L} \cdot \underline{B}_x + \bar{J} \cdot \underline{B}_y'$$

produsul lor se poate scrie astfel: (prin neglijarea termenului $\underline{B}_y \cdot \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{\underline{\mu}} \right)$ care $\rightarrow 0$):

$$\text{grad} \frac{1}{\underline{\mu}} \times \text{rot} \underline{A}' = -\bar{K} \cdot \frac{d\underline{A}'}{dy} \cdot \frac{d}{dy} \left(\frac{1}{\underline{\mu}} \right) \quad (5.26)$$

În mărimi complexe, ecuația (5.25) se scrie:

$$\frac{d^2 \underline{A}'}{dx^2} + \frac{d^2 \underline{A}'}{dy^2} - \frac{1}{\underline{\mu}} \cdot \frac{d\underline{\mu}}{dy} \cdot \frac{d\underline{A}'}{dy} = j\sigma \cdot \underline{\mu} \cdot \omega_2 \cdot \underline{A}' \quad (5.27)$$

unde:

$$\omega_2 = s \cdot \omega$$

s - alunecarea.

Din cauza faptului că $\underline{\mu} = f(\underline{B}) = f(\text{rot} \underline{A}')$, dependența care este cunoscută doar tabelar și nu analitic, ecuația cu

derivate parțiale de ordinul al doilea neliniară, care poate fi considerată ca o funcție implicită de \underline{A}' , se poate rezolva numai prin metode numerice.

B.1. Rezolvarea ecuațiilor ce definesc potențialul magnetic vector s-a bazat pe modelul unidimensional din fig.5.1 în care s-a considerat:

$$\underline{e} = \underline{e}_m \cdot e^{j(\omega t - X \cdot \tilde{\pi} / \tau)} \quad (5.28); \quad \underline{e}_m = \frac{2\sqrt{2}}{\tau} m \cdot N \cdot \underline{I} \quad - \text{solenația inductorului}$$

$$\underline{A} = \underline{a}(y) \cdot e^{j(\omega t - X \tilde{\pi} / \tau)} \quad (5.29) \quad - \text{potențialul magnetic vector în domeniul (I)}$$

$$\underline{A}' = \underline{a}'(y) \cdot e^{j(\omega t - X \tilde{\pi} / \tau)} \quad (5.30) \quad - \text{potențialul magnetic vector în domeniul (II)}$$

Pe baza acestor relații ecuația cu derivate parțiale a potențialului, pentru întrefier, devine:

$$- (\tilde{\pi} / \tau)^2 \cdot \underline{a}(y) + \frac{d^2 \underline{a}(y)}{dy^2} = 0 \quad (5.31)$$

iar pentru indus:

$$- (\tilde{\pi} / \tau)^2 \cdot \underline{a}'(y) + \frac{d^2 \underline{a}'(y)}{dy^2} - \frac{1}{\underline{\mu}} \cdot \frac{d \underline{\mu}}{dy} \cdot \frac{d \underline{a}'(y)}{dy} = j \tilde{\sigma} \cdot \underline{\mu} \cdot \omega_2 \cdot \underline{a}'(y) \quad (5.32)$$

Notînd: $\alpha = \tilde{\pi} / \tau$, soluția ec. 5.31 se rezolvă analitic, sub forma:

$$\underline{a}(y) = \underline{c}_1 \cdot e^{\alpha y} + \underline{c}_2 \cdot e^{-\alpha y} \quad (5.33)$$

Neliniaritatea ecuației 5.32 și cunoașterea tabelară a curbei de isterază fac posibilă o rezolvare numai numerică a acestei ecuații.

Deoarece factorul $\frac{d \underline{\mu}}{dy}$ nu se cunoaște inițial, se face înlocuirea:

$$\frac{d \underline{\mu}}{dy} = \frac{d \underline{\mu}}{d \left(\frac{d \underline{a}'(y)}{dy} \right)} \cdot \frac{d^2 \underline{a}'(y)}{dy^2} \quad \text{unde} \quad \frac{d \underline{\mu}}{d \left(\frac{d \underline{a}'(y)}{dy} \right)} \quad \text{se cunoaște din derivarea grafică a curbei de magnetizare.}$$

și ecuația (5.32) devine:

$$-\alpha^2 \cdot a'(y) + \frac{d^2 a'(y)}{dy^2} - \frac{1}{\mu} \cdot \frac{d\mu}{d\left(\frac{da'(y)}{dy}\right)} \cdot \frac{d^2 a'(y)}{dy^2} \cdot \frac{da'(y)}{dy} = j\sqrt{\mu} \cdot \omega \cdot a'(y) \quad (5.34)$$

Din bucla de istereză se cunoaște $\mu = f_1(B)$ și $B = f_2(H)$ rezultă din curba de magnetizare obținută prin unirea vîrfurilor buclelor de istereză.

Se poate calcula $(d\mu/dB)$ adică $(d\mu/d\left(\frac{da'(y)}{dy}\right))$.

Mai jos se dă tabelar, pentru materialul feromagnetic al inducoului, dependența funcție de inducție, a cîmpului magnetic, a permeabilității magnetice complexe μ și a derivatei permeabilității în raport cu inducția.

Tabela 5.6

B [T]	H [A/m]	μ	$\dot{\mu}$ dB
0,1	100	0,0019-j 0,00027	0,000 - j 0,00115
0,2	150	0,0019-j 0,000155	0,000 - j 0,00045
0,3	200	0,0019-j 0,00011	0,000 - j 0,00018
0,4	250	0,0019-j 0,000092	0,000 - j 0,00006
0,5	290	0,0019-j 0,000086	0,000 - j 0,00013
0,6	320	0,0019-j 0,000073	0,000 - j 0,00004
0,7	370	0,0019-j 0,000069	0,000 - j 0,00012
0,8	440	0,00182-j 0,000057	-0,0002-1j 0,00007
0,9	500	0,0018 -j 0,000050	-0,001 - j 0,0001
1,0	590	0,0017 -j 0,000040	-0,001 - j 0,00009
1,1	680	0,0016 - j 0,000031	-0,001 - j 0,00008
1,2	780	0,00154- j 0,000023	-0,001 - j 0,00002
1,3	900	0,00145- j 0,000021	-0,0015- j 0,00006
1,4	1050	0,0013 - j 0,000015	-0,0015- j 0,00003
1,5	1230	0,0012 - j 0,0000125	-0,0015- j 0,00003
1,6	1500	0,00107 - j 0,0000087	-0,0017- j 0,000032
1,7	1900	0,0009 - j 0,0000055	-0,002 - j 0,000033
1,8	2600	0,0007 - j 0,0000032	-0,002 - j 0,000014
1,9	3500	0,00054 - j 0,0000018	-0,0023- j 0,000009
2,0	5100	0,00039 - j 0,00000092	-0,0023- j 0,000009
2,1	10.000	0,00021 - j 0,00000026	

Pentru $B \geq 2T$ calculul are la bază considerarea zonei saturate sub forma:

$$\mu = \frac{0,1 * B}{4900 * B - 9290} \cdot \left[1 - j (0,00235 - (B-2) \cdot 0,0112) \right] \quad (5.35)$$

Determinarea experimentală a caracteristicilor magnetice ale materialului s-a făcut pe un eșantion de forma unui tor cu diametrul exterior de 55 mm și cel interior de 50 mm. Pe suprafața torului au fost plasate 2 înfășurări uniforme repartizate: una de excitație, cealaltă de indus și pentru ridicarea grafică a buclei de histereză s-a folosit un osciloscop cu 2 spoturi. În Fig. 5.7 e dată forma buclei de histereză.

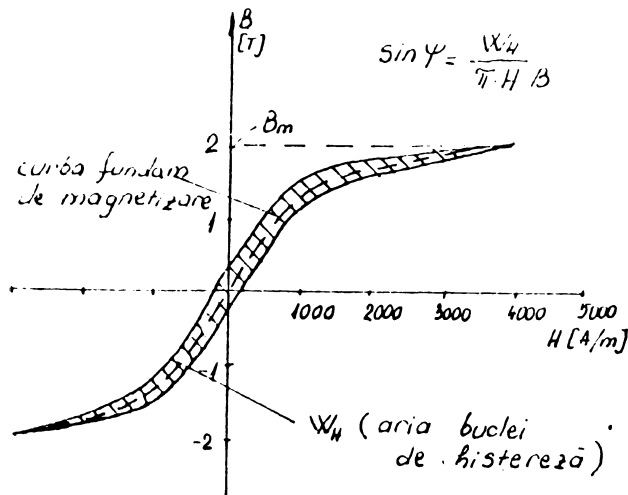


Fig.5.7. Buclea de histereză la materialul feromagnetic al indușului

$$\mu = \frac{B}{H} e^{-j\psi}$$

În rezolvarea ecuației 5.34 se pornește de la condițiile la limită:

- la $y = 0$

- continuitatea componentelor tangente ale câmpului pentru suprafața inductor-întrefier:

$$\frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\partial A}{\partial y} = \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (5.36)$$

- la $y = \delta$

- continuitatea componentelor normale ale inducției pentru suprafața întrefier-indus:

$$\underline{a} \Big|_{y=\delta} = \underline{a}' \Big|_{y=\delta} \quad (5.37)$$

- continuitatea componentelor tangente ale câmpului pentru suprafața întrefier-indus:

$$\frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\partial \underline{A}(y)}{\partial y} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial \underline{A}'(y)}{\partial y} \quad (5.38)$$

Metoda de rezolvare.

Calculul începe considerându-se cunoscută valoarea inducției pe suprafața indusului ($\underline{B}_x = \frac{d\underline{a}(y)}{dy}$). Având în vedere condițiile la limită se obține:

$$\underline{a} \Big|_{y=\delta} = - \frac{\mu_0}{\mu \cdot \alpha} \cdot \frac{d\underline{a}'}{dy} \Big|_{y=\delta} \quad (5.39)$$

$$\underline{e}_m = + \frac{2p}{\mu_0 \alpha} \cdot j \cdot \ell \cdot \frac{d\underline{a}'}{dy} \Big|_{y=\delta} \quad (5.40)$$

$$\frac{d^2 \underline{a}'}{dy^2} \Big|_{y=\delta} = \frac{(\alpha^2 + j\sigma \cdot \mu \cdot s \cdot \omega) \underline{a}' \Big|_{y=\delta}}{\left(1 - \frac{1}{\mu} \cdot \frac{d\mu}{d\left(\frac{d\underline{a}'}{dy}\right)} \cdot \frac{d\underline{a}'}{dy}\right)} \quad (5.41)$$

Astfel, se cunosc valorile funcției $\underline{a}'(y)$, (potențialul magnetic) și ale derivatelor sale de ordinul 1 și 2, pe suprafața indusului.

La distanța $y = \delta + h$ (h - pasul de integrare) valorile funcției $\underline{a}'(y)$ și derivatele sale rezultă din valorile cunoscute la $y = \delta$ (pe suprafața indusului):

$$\underline{a}' \Big|_{y=\delta+h} = \underline{a}' \Big|_{y=\delta} + \frac{d\underline{a}'}{dy} \Big|_{y=\delta} \cdot h \quad (5.42)$$

$$\left. \frac{d \underline{a}'}{dy} \right|_{y=\delta+h} = \left. \frac{d \underline{a}'}{dy} \right|_{y=\delta} + \left. \frac{d^2 \underline{a}'}{dy^2} \right|_{y=\delta} \cdot h \quad (5.43)$$

Derivata de ordinul 2: $\left. \frac{d^2 \underline{a}'}{dy^2} \right|_{y=\delta+h}$ se calculează cu relația (5.42) în care

$$y = \delta \rightarrow y = \delta + h.$$

Calculul se repetă și pentru $y = \delta + 2h$ ș.a.m.d. până la $y = \delta + d_1$ (d_1 - grosimea indușului) unde rezultă un câmp magnetic aproape nul.

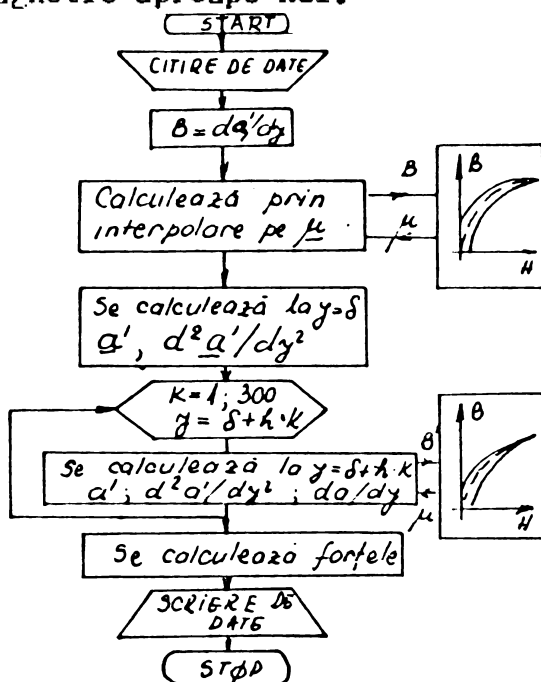


Fig.5.8. Organigrama de calcul.

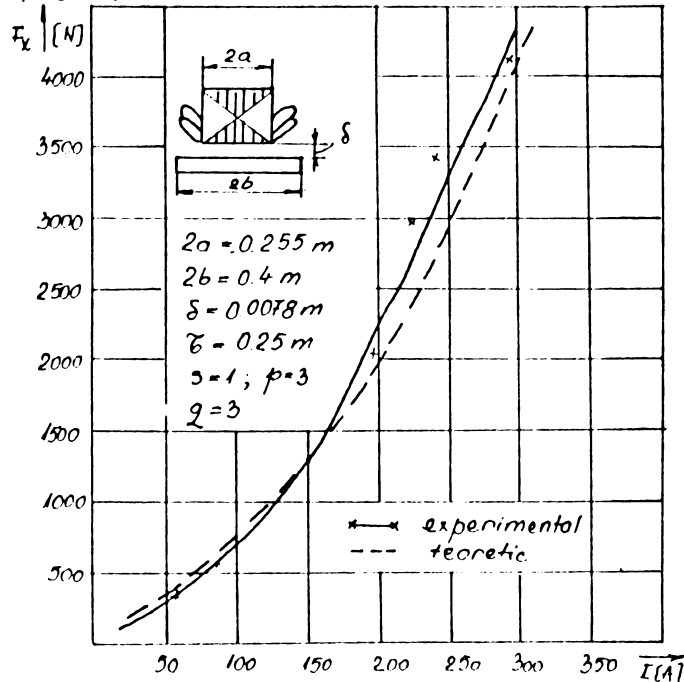
$B = da'/dy \Big|_{y=\delta}$ - valoare inițială de calcul și reprezintă câmpul magnetic la suprafața indușului.

Dacă performanțele M.L. se cer a fi calculate la curent constant (sau tensiune constantă) calculul se reia ciclic prin schimbarea valorii lui $da'/dy \Big|_{y=\delta}$ până se obține valoarea fixată pentru curent. (sau tensiune)

Pe baza valorilor potențialului magnetic vector se calculează densitatea de curent din induș ($\underline{J} = \sigma \underline{E} = -\sigma \frac{\partial \underline{A}'}{\partial t}$) și câmpul ($\underline{B} = \text{rot } \underline{A}'$) calculându-se astfel forța longitudinală:

$$F = \int_V \frac{\sigma \cdot \omega_2 \cdot \pi}{\sigma} |\underline{a}'(y)|^2 dv \quad (5.41)$$

Integrala de mai sus s-a rezolvat pe cale numerică. S-a putut astfel determina caracteristica $F = f(I)$ la alunecare $S = 1$. (fig.5.9).



Rezolvarea numerică a considerării isterezei conduce la rezultate teoretice satisfăcătoare așa cum rezultă și din fig.5.9.

Metoda de rezolvare este rapid convergentă și universal valabilă la toate materialele cu buclă de istereză, buclă care se consideră dată tabelor în memoria calculatorului numeric.

Un listing al programului de calcul este dat în anexa 5.

V.2. Metodă grafo-analitică de calcul al M.L. cu indus feromagnetic.

Folosirea ordinatorului în obținerea performanțelor M.L. unilaterale cu indus feromagnetic nu este totdeauna posibilă.

De multe ori, pretențiile asupra rezultatelor teoretice nefiind prea ridicate, rapiditatea și ușurința calculului se impun cu necesitate.

Metoda prezentată la acest paragraf se bazează pe folosirea unor diagrame general valabile, pe baza cărora se obțin mărimile cele mai importante ce caracterizează funcționarea M.L.

Calculul este simplu și se poate face manual (cu sau fără riglă de calcul), într-un timp scurt obținându-se informații utile privind valoarea forțelor (longitudinală sau normală) și a altor mărimi ce intervin în funcționare.

Ipoteze simplificatoare de calcul:

- 1) se iau în considerare numai armonicile fundamentale ale mărimilor de stare.
- 2) curba de magnetizare a materialului indusului se aproximează prin relația:

$$H = \frac{B}{\mu \left[1 - \left(\frac{B}{B_s} \right)^2 \right]} \quad (5.46)$$

unde

μ - valoarea permeabilității magnetice corespunzătoare porțiunii liniare a curbei de magnetizare
 B_s - inducția de saturație maximă

- 3) efectul transversal se consideră prin coeficientul K_2 [cap.I].
- 4) câmpul magnetic în indus are numai 2 componente: H_x, H_y [fig.5.10].
- 5) mărimile de câmp după axa Z au derivate nule (sînt deci constante în direcția lui Z).

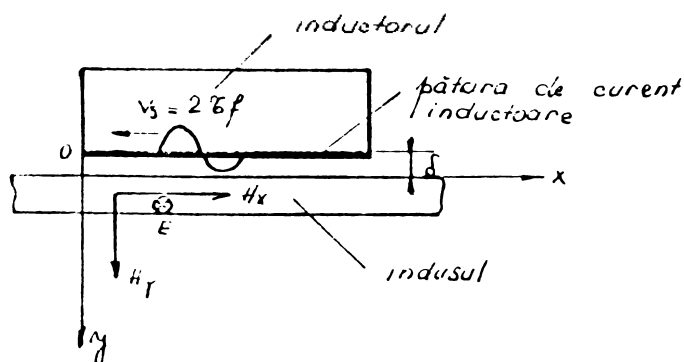


Fig.5.10. Modelul de calcul.

H - câmpul magnetic
 E - câmpul electric.

Ecuațiile mărimilor de câmp pentru indus se scriu sub forma:

$$\begin{aligned} \text{rot } \underline{H} &= \underline{J} \\ \text{rot } \underline{E} &= - \frac{\partial \underline{B}}{\partial t} \end{aligned} \quad (5.47)$$

Deoarece se consideră numai armonicile fundamentale, mărimile de câmp se pot scrie, în complex, în modul următor:

$$\begin{aligned} H &= I_m \left[\sqrt{2} \underline{H}_0 \cdot e^{j(\omega t + x\tilde{\eta}/\tau)} \right] \\ B &= I_m \left[\sqrt{2} \underline{B}_0 \cdot e^{j(\omega t + x\tilde{\eta}/\tau)} \right] \\ E &= I_m \left[\sqrt{2} \underline{E}_0 \cdot e^{j(\omega t + x\tilde{\eta}/\tau)} \right] \end{aligned} \quad (5.48)$$

În acest fel, ecuațiile 5.47 devin:

$$\begin{aligned} j\tilde{\eta}/\tau \cdot \underline{H}_y - \frac{d \underline{H}_x}{dy} &= \sigma \cdot \underline{E} \\ \frac{d \underline{E}}{dy} &= -j\omega_2 \cdot \underline{B}_x \\ j\tilde{\eta}/\tau \cdot \underline{E} &= j\omega_2 \cdot \underline{B}_y \end{aligned} \quad (5.49)$$

unde σ - conductibilitatea materialului indusului

$$\omega_2 = S \cdot \omega_1 \quad (\omega_1 - \text{pulsăția curentului din inductor})$$

Rezolvarea ecuațiilor 5.49 se face introducând mărimea

$$\underline{Z} = \underline{B}/\underline{H}_x \quad (5.50)$$

numită impedanță de undă corespunzătoare vectorului

$$\text{Poynting } \underline{S}_x = \underline{E} \times \underline{H}_x$$

Valoarea complexă a impedanței de undă \underline{Z} depinde numai de y și deci:

$$\frac{d \underline{Z}}{dy} = \frac{1}{\underline{H}_x} \cdot \frac{d \underline{E}}{dy} - \frac{\underline{E}}{\underline{H}_x^2} \cdot \frac{d \underline{H}_x}{dy} = -j\omega_2 \cdot \frac{\underline{B}_x}{\underline{H}_x} + \sigma \cdot \underline{Z}^2 - j\tilde{\eta}/\tau \cdot \underline{Z} \cdot \frac{\underline{H}_y}{\underline{H}_x} \quad (5.51)$$

Notând $|\underline{H}_x| = H_0$ se poate scrie:

$$\frac{1}{H_0} \cdot \frac{d H_0}{dy} = \frac{d}{dy} (\ln H_0) = \text{Re} \left[\frac{d}{dy} (\ln \underline{H}_x) \right] = \text{Re} \left[\frac{1}{\underline{H}_x} \cdot \frac{d \underline{H}_x}{dy} \right] \quad (5.52)$$

și astfel ecuațiile 5.49 devin:

$$\frac{1}{H_0} \cdot \frac{dH_0}{dz} = -\bar{G} \cdot R_0(z) - (\tilde{\tau}/\epsilon) \cdot \text{Im} \left\{ \frac{H_y}{H_x} \right\} \quad (5.53)$$

unde $\underline{z} = \frac{\tilde{\tau} \omega_2}{\tilde{\tau}} \cdot \underline{H}_y$ și $\underline{H}_x = \frac{B}{\tilde{\tau}} = \frac{\tilde{\tau} \omega_2}{\tilde{\tau}} \cdot \frac{H_y}{\underline{z}}$ relațiile (5.51) și (5.53) conduc la expresia:

$$\left[\bar{G} \cdot R_0(\underline{z}) + \tilde{\tau}^2 / (\epsilon^2 \cdot \omega_2) \cdot \text{Im}(\underline{z} \cdot \underline{H}_y / \underline{H}_x) \right] \cdot H_0 \cdot \frac{d\underline{z}}{dH_0} = j \cdot \omega_2 \cdot \frac{B_x}{H_x} - \bar{G} \cdot \underline{z}^2 + j \frac{\tilde{\tau}^2}{\epsilon^2 \cdot \omega_2 \cdot B_y} \cdot \underline{z}^2 \quad (5.54)$$

Relația (5.54) este o ecuație diferențială pentru funcția $\underline{z}(H_0)$.

$\underline{B}_y / \underline{H}_y$ și $\underline{B}_x / \underline{H}_x$ reprezintă valorile complexe ale permeabilității în direcția axei y , respectiv x și acestea vor trebui scrise funcție de \underline{z} și H_0 .

Considerind $B_y = B_m \cdot \sin(\omega t + \tilde{\tau}/\epsilon \cdot x + \psi)$ și notînd

$$\alpha = \omega t + (\tilde{\tau}/\epsilon) \cdot x + \psi \quad (5.55)$$

rezultă $B_y = B_m \cdot \sin \alpha$ și deoarece $\underline{H}_x = \frac{\tilde{\tau} \cdot \omega_2}{\tilde{\tau}} \cdot \frac{B_y}{\underline{z}}$ se va obține:

$$\underline{H}_x = \frac{\omega_2 \cdot \tilde{\tau}}{\tilde{\tau}} \cdot \frac{B_m}{\underline{z}} \cdot \sin(\alpha - \varphi) = H_m \cdot \sin(\alpha - \varphi) \quad (5.56)$$

unde

$$\underline{z} = |\underline{z}|$$

$$\varphi = \arg(\underline{z})$$

La neglijarea isterезei $H = \sqrt{H_x^2 + H_y^2}$; $B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}$;

$H_x/H = B_x/B$ și folosind relația $H = \frac{B}{\mu \cdot \left[1 - \left(\frac{B}{B_s} \right)^2 \right]}$ se poate scrie:

$$H_x \cdot \sqrt{B_x^2 + B_y^2} = B_x \cdot \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\sqrt{B_x^2 + B_y^2}}{1 - \frac{B_x^2 + B_y^2}{B_g^2}} \quad (5.57)$$

sau :

$$B_x = \frac{2 \cdot \mu \cdot H_m \cdot \sin(\alpha - \varphi) \cdot (B_g^2 - B_m^2 \cdot \sin^2 \alpha)}{B_g^2 + \sqrt{B_g^4 + 4 \mu^2 \cdot H_m^2 \cdot \sin^2(\alpha - \varphi) \cdot (B_g^2 - B_m^2 \cdot \sin^2 \alpha)}} \quad (5.58)$$

Deoarece $B_m = \sqrt{2} \cdot \frac{\tilde{T}}{\tilde{C} \cdot \omega_2} \cdot Z \cdot H_0$, relația (5.58) devine:

$$B_x = \frac{2 \sqrt{2} \cdot \mu \cdot H_0 \cdot \sin(\alpha - \varphi) \cdot (B_g^2 - \frac{2 \cdot \tilde{T}^2}{\tilde{C}^2 \cdot \omega_2^2} \cdot Z^2 \cdot H_0^2 \cdot \sin^2 \alpha)}{B_g^2 + \sqrt{B_g^4 + 8 \mu^2 \cdot H_0^2 \cdot \sin^2(\alpha - \varphi) \cdot (B_g^2 - \frac{2 \cdot \tilde{T}^2}{\tilde{C}^2 \cdot \omega_2^2} \cdot Z^2 \cdot H_0^2 \cdot \sin^2 \alpha)}} \quad (5.59)$$

și deoarece $H_y = \frac{B_y}{B_x} \cdot H_x$, rezultă:

$$H_y = \frac{\sqrt{2} \cdot \frac{\tilde{T}}{\tilde{C} \cdot \omega_2} \cdot Z \cdot H_0 \cdot \sin \alpha \cdot \left[B_g^2 + \sqrt{B_g^4 + 8 \mu^2 \cdot H_0^2 \cdot \sin^2(\alpha - \varphi) \cdot (B_g^2 - \frac{2 \cdot \tilde{T}^2}{\tilde{C}^2 \cdot \omega_2^2} \cdot Z^2 \cdot H_0^2 \cdot \sin^2 \alpha)} \right]}{2 \mu \cdot (B_g^2 - \frac{2 \cdot \tilde{T}^2}{\tilde{C}^2 \cdot \omega_2^2} \cdot Z^2 \cdot H_0^2 \cdot \sin^2 \alpha) \cdot \sqrt{(B_g^2 - \frac{2 \cdot \tilde{T}^2}{\tilde{C}^2 \cdot \omega_2^2} \cdot Z^2 \cdot H_0^2 \cdot \sin^2 \alpha)}} \quad (5.60)$$

Valorile complexe ale permeabilităților se notează astfel:

$$\frac{B_x}{H_x} = \mu (p_1 + j q_1) \quad (5.61)$$

$$\frac{B_y}{H_y} = \mu \cdot \frac{1}{(p_2 + j q_2)}$$

Calculul lui p_1, p_2 se face compunând armonicile în fază, iar calculul lui q_1, q_2 compunând armonicile defazate cu $\pi/2$:

$$p_1 = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \mu \cdot H_0 \cdot \pi} \int_0^{2\pi} B_x(\alpha) \cdot \sin(\alpha - \varphi) \cdot d\alpha \quad (5.62)$$

$$p_2 = \frac{\sigma \cdot \omega_2 \cdot \mu}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot Z \cdot H_0 \cdot \pi} \int_0^{2\pi} H_y(\alpha) \cdot \sin \alpha \cdot d\alpha \quad (5.63)$$

$$q_1 = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \mu \cdot H_0 \cdot \pi} \int_0^{2\pi} B_x(\alpha) \cdot \cos(\alpha - \varphi) \cdot d\alpha \quad (5.64)$$

$$q_2 = \frac{\sigma \cdot \omega_2 \cdot \mu}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot Z \cdot H_0 \cdot \pi} \int_0^{2\pi} H_y(\alpha) \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha \quad (5.65)$$

În acest mod s-a arătat că mărimile p_1, q_1, p_2, q_2 depind numai de Z și H_0 și înlocuindu-le în (5.54) se obține o ecuație diferențială pentru funcția $Z = f(H_0)$.

Rezolvarea ecuației diferențiale 5.54 se face printr-o metodă numerică reducând problema la rezolvarea unui sistem de ecuații diferențiale de ordinul I. (5.71).

Notînd:

$$f = \sqrt{\frac{\sigma}{\omega_2 \cdot \mu}} \operatorname{Re}(Z) \quad (5.66)$$

$$g = \sqrt{\frac{\sigma}{\omega_2 \cdot \mu}} \cdot \operatorname{Im}(Z) \quad (5.67)$$

$$u = \frac{\mu^2 \cdot H_0^2}{B_s^2} \quad (5.68)$$

$$l = \frac{\sigma^2 \cdot \sigma \cdot \mu \cdot \omega_2}{\gamma^2} \quad (5.69)$$

$$\varphi = \arctg(g/f) \quad (5.70)$$

și separînd în relația (5.54) partea reală de cea imaginară se obține următorul sistem de ecuații diferențiale:

$$2(l \cdot f + q_2 \cdot f + p_2 \cdot g) \cdot u \cdot \frac{df}{du} = -l \cdot q_1 + l(g^2 - f^2) + q_2 \cdot (g^2 - f^2) - 2p_2 \cdot f \cdot g \quad (5.71)$$

$$2(l \cdot f + q_2 \cdot f + p_2 \cdot g) \cdot u \cdot \frac{dg}{du} = l \cdot p_1 - 2 \cdot f \cdot g \cdot l + p_2(f^2 - g^2) - 2q_2 \cdot f \cdot g$$

Din (5.62), (5.64) folosind (5.59), (5.60) se poate scrie:

$$p_1 = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{\sin^2(\alpha - \varphi) \cdot (1 - 2u \cdot \frac{f^2 + g^2}{l} \cdot \sin^2 \alpha)}{1 + \sqrt{1 + 8 \cdot u \cdot \sin^2(\alpha - \varphi) \cdot (1 - 2u \cdot \frac{f^2 + g^2}{l} \cdot \sin^2 \alpha)}} d\alpha \quad (5.72)$$

$$q_1 = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{\sin(\alpha - \varphi) \cdot \cos(\alpha - \varphi) \cdot (1 - 2u \cdot \frac{f^2 + g^2}{l} \cdot \sin^2 \alpha)}{1 + \sqrt{1 + 8 \cdot u \cdot \sin^2(\alpha - \varphi) \cdot (1 - 2u \cdot \frac{f^2 + g^2}{l} \cdot \sin^2 \alpha)}} d\alpha \quad (5.73)$$

și analog pentru p_2, q_2 .

Pentru $H_0 = 0$, deci $u = 0$, rezultă $p_1 = 1, p_2 = 1, q_1 = 0; q_2 = 0$ și notînd $f|_{u=0} = f_0; \frac{df_1}{du}|_{u=0} = p_{10}$

$$g|_{u=0} = g_0; \frac{df_2}{du}|_{u=0} = p_{20}$$

$$\frac{df}{du}|_{u=0} = f_1; \frac{dq_1}{du}|_{u=0} = q_{10}$$

$$\frac{dg}{du}|_{u=0} = g_1; \frac{dq_2}{du}|_{u=0} = q_{20}$$

pe baza relațiilor (5.71 + 5.73), rezultă:

$$f_0 = \frac{l \sqrt{l}}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{1+l^2} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1+l^2}}} \quad (5.74)$$

$$g_0 = \frac{\sqrt{l}}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{1+l^2}} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1+l^2}} \quad (5.75)$$

$$p_{10} = -\frac{3}{2} \left(1 + \frac{f_0^2 + g_0^2}{2l} \right) \quad (5.76)$$

$$q_{10} = -f_0 \cdot g_0 / l \quad (5.77)$$

$$p_{20} = \frac{3}{2} \cdot \frac{f_0^2 + g_0^2}{l} + \frac{3f_0^2 + g_0^2}{2(f_0^2 + g_0^2)} \quad (5.78)$$

$$q_{20} = -f_0 \cdot g_0 / (f_0^2 + g_0^2) \quad (5.79)$$

$$f_1 = \frac{K_1 K_3 + K_2 \cdot K_4}{K_1^2 + K_2^2} \quad (5.80)$$

$$g_1 = \frac{K_1 \cdot K_4 - K_2 K_3}{K_1^2 + K_2^2} \quad (5.81)$$

unde:

$$K_1 = 4(l \cdot f_0 + g_0)$$

$$K_2 = 2(l \cdot g_0 - f_0)$$

$$K_3 = -f_0 \cdot g_0 \left(1 + \frac{3}{2} \frac{f_0^2 + g_0^2}{f_0^2 + g_0^2} \right)$$

$$K_4 = -\frac{3}{2} l - \frac{3f_0^2 + g_0^2}{2} + \frac{2f_0^2 (2f_0^2 - g_0^2)}{f_0^2 + g_0^2}$$

În sistemul de ecuații diferențiale (5.71) se cunosc valoarea funcției și a derivatelor ei în punctul $u = 0$ și cu aceste valori inițiale sistemului se rezolvă numeric.

Integralele (5.72), (5.73) se rezolvă tot numeric folosind metoda Romberg [D4]. La calculul lor s-a folosit notația:

$$r = \frac{2u}{l} \cdot (f^2 + g^2) \quad (5.82)$$

Din (5.66), (5.67) relația (5.82) ia forma:

$$r = \frac{2 \cdot H_0^2 \cdot \tilde{\pi}^2 \cdot Z^2}{B_s^2 \cdot \tilde{\epsilon}^2 \cdot \omega_2^2} \quad \text{sau } r = \left(\frac{B_m}{B_s} \right)^2 \quad \text{deoarece } B_m = \frac{\sqrt{2} \cdot \tilde{\pi}}{\tilde{\epsilon} \cdot \omega_2} H_0 \cdot Z$$

Rezultatele obținute s-au reprezentat în fig.5.11, 5.12 cu "r" ca parametru.

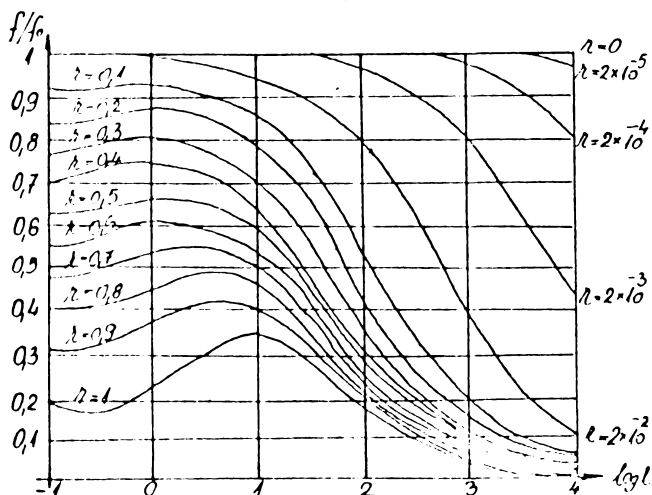
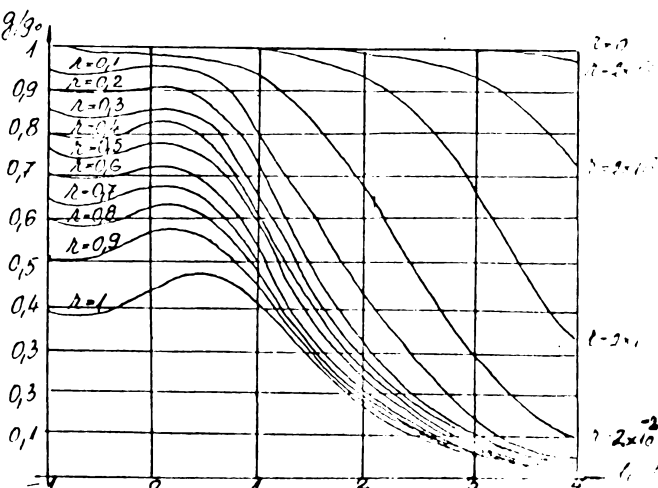


Fig.5.11. Variația lui f/f_0 cu $lg l$.



5.12. Variația lui f/P_0 cu $lg l$.

Calculul forțelor.

Forța longitudinală corespunzătoare suprafeței indusului $S = 2p \tilde{\epsilon} \cdot 2b$, pe baza tensorului lui Maxwell se scrie

$$F_x = 2p \tilde{\epsilon} \cdot 2b \cdot \text{REAL} (\underline{B}_y^* \underline{H}_x^*) = 2p \tilde{\epsilon} \cdot 2b \cdot H_0^2 \cdot \frac{\tilde{\pi}}{\tilde{\epsilon} \cdot \omega_2} \cdot \text{REAL} (\underline{Z}) \quad (5.83)$$

Analog, forța normală :

$$F_y = \frac{2p \tilde{\epsilon} \cdot 2b}{2\mu_0} (|\underline{B}_y|^2 - |\underline{B}_x|^2) = 2p \tilde{\epsilon} \cdot b \cdot \mu_0 \cdot H_0^2 \left(\frac{\tilde{\pi}^2}{\mu_0^2 \cdot \tilde{\epsilon}^2 \cdot \omega_2^2} \cdot Z^2 - 1 \right) \quad (5.84)$$

Relațiile deduse fac posibilă o determinare a forțelor într-un mod extrem de simplu, cu toate că formulele par complicate.

Calculul se începe plecând de la mărimea B_m care se presupune cunoscută. Rezultă $r = (B_m/B_s)^2$ și cu relația (5.69):

$l = \frac{\sigma^2 \cdot \mu \cdot \omega_2}{\tilde{\pi}^2}$. Din fig. 5.11, 5.12 cunoscând r , l rezultă r/r_0 , g/g_0 . Cunoscând $f_0 = \frac{l \sqrt{l}}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{1+l^2} \cdot \sqrt{1+\sqrt{1+l^2}}}$ și

$f_0 = \frac{\sqrt{l}}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{1+l^2}} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1+l^2}}$ se poate calcula f, g și

$$\text{altfel } R_e(\underline{z}) = f \cdot \sqrt{\frac{\omega_2 \cdot \mu}{\sigma}} ; I_m(\underline{z}) = g \sqrt{\frac{\omega_2 \cdot \mu}{\sigma}} \quad (5.85)$$

Mărimea H_0 se află din $H_0 = \frac{\omega_2 \cdot \sigma \cdot B_m}{\sqrt{2} \cdot \tilde{\pi} \cdot \underline{z}}$. Cu ajutorul relațiilor 5.83, 5.84 se calculează forțele.

Calculul curentului și al tensiunii

Calculul curentului se face pe baza schemei echivalente serie a mașinii, dată în fig. 5.13.

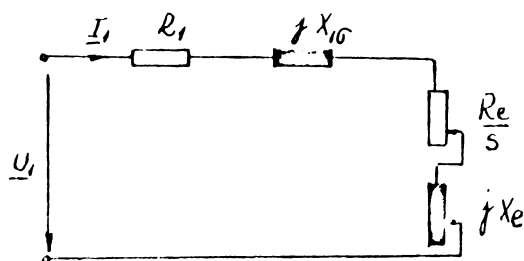


Fig. 5.13. Schema echivalentă serie a M.L.

$R_1 + jX_{1G}$ - impedanța inducătorului

$R_e/s + jX_e$ - impedanța echivalentă a ansamblului indus-întrefier.

Impedanța echivalentă a ansamblului indus-întrefier:

$$\underline{Z}_e(s) = \frac{R_e}{s} + j X_e \quad (5.86)$$

este calculată prin transformarea celor 2 impedanțe legate în paralel:

Z_m - impedanța de magnetizare;

$Z(s)$ - impedanța indusului redusă la inductor.

Impedanța de magnetizare:

$$Z_m = jX_m = \frac{j 4 \cdot \mu_0 \cdot \omega \cdot \sigma \cdot m \cdot N^2 \cdot a}{\tilde{\pi}^2 \cdot p \cdot \sigma'} \quad (5.87)$$

unde - N - numărul de spire în serie pe fază.

σ' - întrefierul echivalent (se poate calcula după [B21]).

Impedanța indusului redusă la inductor:

$$\underline{Z}(s) = \frac{4 \cdot m(K_B \cdot N)^2 \cdot s}{p \cdot \zeta} \cdot \left(\frac{R_e(\underline{Z})}{s} + j \frac{I_m(\underline{Z})}{s} \right) \quad (5.87)$$

unde:

$$\left. \begin{array}{l} R_e(\underline{Z}) \\ I_m(\underline{Z}) \end{array} \right\} \text{ se calculează după relațiile (5.85)}$$

Cu aceste precizări, impedanța echivalentă a ansamblului indus-întrefier calculată prin:

$$\underline{Z}_e(s) = \frac{jX_m \cdot \underline{Z}(s)}{jX_m + \underline{Z}(s)} \quad (5.88)$$

este perfect determinată.

În acest mod puterea electromagnetică activă din întrefier apare sub forma:

$$P_a = 3 \cdot I_1^2 \cdot R_e(\underline{Z}_e(s)) \quad (5.89)$$

și deoarece $P_a = F_x \cdot V_s = F_x \cdot 2 \cdot \zeta \cdot f$, rezultă că se poate calcula curentul atunci când se cunoaște forța și parametrii indusului:

$$I_1^2 = \frac{F_x \cdot 2 \cdot \zeta \cdot f}{3 \cdot R_e(\underline{Z}_e(s))} \quad (5.90)$$

Cunoscînd curentul I_1 , tensiunea U_1 , la bornele mașinii rezultă imediat:

$$\underline{U}_1 = \underline{I}_1 \cdot (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_e(s)) \quad (5.91)$$

și astfel toate celelalte mărimi se pot calcula.

De exemplu, randamentul și factorul de putere sînt:

$$\eta = \frac{F_x \cdot V}{3 \cdot I_1^2 \left(R_1 + \frac{R_c}{s} \right)} \quad (5.92)$$

$$\cos \varphi = \frac{3 \cdot I_1^2 \cdot (R_1 + R_c/s)}{3 \cdot U_1 \cdot I_1}$$

V.3. Calculul simplificat al M.L. unilateral considerând efectul transversal și cel de saturație.

Modificarea parametrilor indusului feromagnetic cu gradul de saturație este luată în considerare prin folosirea curbei de magnetizare reale și se ține de asemenea seama de rezistența de întoarcere a curenților induși, deci de efectul transversal.

Relațiile analitice de calcul sînt ușor utilizabile la calculul performanțelor motoarelor liniare, fiind direct aplicabile și la motoarele asincrone cu rotor masiv.

Analiza dată se limitează la indusul feromagnetic fără aluminiu în secundar.

Teoria se bazează pe următoarele ipoteze:

- toate mărimile variază sinusoidal în timp,
- se neglijează efectul longitudinal (la un număr mare de poli și la viteze mici efectul longitudinal are o pondere scăzută);
- se consideră numai fundamentala păturii de curent inductoare înfășurarea fiind în două straturi, cu creștăturile marginale semibobinate;
- numărul echivalent de poli se consideră $2p$ (numărul real de poli fiind $2p + 1$)
- se neglijează isteriza materialului indusului iar permeabilitatea magnetică a pachetului de tole se ia infinită
- mașina este simetrică față de axa oy .

Ecuatiile lui Maxwell:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \underline{H} &= \underline{J} \\ \operatorname{rot} \underline{E} &= - \frac{\partial \underline{B}}{\partial t} \\ \operatorname{div} \underline{B} &= 0 \\ \operatorname{div} \underline{E} &= 0 \end{aligned} \quad (5.93)$$

se rezolvă folosind un sistem de coordonate cu originea pe suprafața indusului și fix față de indus (fig.5.16).

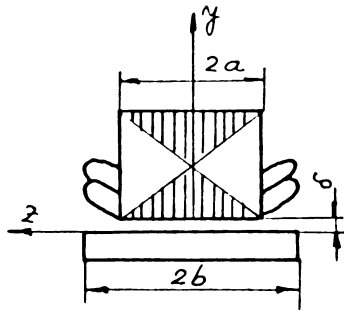


Fig.5.16. Sistemul de coordonate

2a - lățimea inductorului

2b - lățimea indușului

Folosind potențialul magnetic vector \underline{A} , definit ca $\underline{B} = \text{rot } \underline{A}$ și deoarece $\underline{E} = - \frac{\partial \underline{A}}{\partial t}$, ecuațiile 5.93 se scriu sub forma:

$$\frac{\partial^2 \underline{A}_K}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \underline{A}_K}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \underline{A}_K}{\partial z^2} = \mu \cdot \sigma \cdot \frac{\partial \underline{A}_K}{\partial t} \quad (5.94)$$

unde:

$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ - permeabilitatea materialului feromagnetic al indușului

σ - conductibilitatea electrică a indușului

\underline{A}_K - proiecțiile vectorului \underline{A} pe axele x,y,z
(K = X,y,Z)

Deoarece $\underline{A}_K = A_K \cdot e^{j(\alpha x + s \omega t)}$ (cu $\alpha = \tilde{\nu}/\mathcal{C}$; \mathcal{C} pasul polar;

s - alunecarea; ω - pulsația unghiulară a solenației inductoare), ecuația (5.94) ia următoarea formă:

$$\frac{\partial^2 \underline{A}_K}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \underline{A}_K}{\partial z^2} = (\alpha^2 + \underline{\lambda}^2) \underline{A}_K \quad (5.95)$$

unde

$$\underline{\lambda}^2 = j s \omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma$$

Impunând condițiile la limită și de simetrie date în [B1], soluțiile ecuației (5.95) sînt următoarele [Y2]:

$$\underline{A}_x = - j J_{sm} \cdot \underline{m} \cdot \left[e^{\lambda y} \cdot \frac{\text{sh} \frac{\lambda}{\beta} z}{\text{sh} \frac{\lambda}{\beta} a} + (e^{\alpha y} - e^{\lambda y}) \cdot \frac{\text{sh} \frac{\lambda}{\beta} z}{\text{sh} \frac{\lambda}{\beta} a} \right] e^{j(\alpha x + s \omega t)} \quad (5.96)$$

$$\underline{A}_z = J_{sm} \cdot \underline{m} \cdot e^{\lambda y} \left(- \frac{\alpha}{\beta} \cdot \frac{\text{ch} \frac{\lambda}{\beta} z}{\text{sh} \frac{\lambda}{\beta} a} + \underline{K} \right) \cdot e^{j(\alpha x + s \omega t)} \quad (5.97)$$

$$\underline{A}_y = J_{sm} \cdot \underline{m} \cdot (e^{\lambda y} - e^{\alpha y}) \cdot \frac{\text{sh } \lambda z}{\text{sh } \lambda a} \cdot e^{j(\alpha x + s\omega t)} \quad (5.98)$$

unde:

$$\underline{\beta} = \sqrt{\alpha^2 + \frac{\lambda}{\mu_r \cdot \delta}}$$

$$\underline{K} = \text{cth } \lambda a + \frac{\alpha}{\underline{\beta}} \text{cth } \underline{\beta} a$$

$$\underline{m} = \frac{\mu_0}{2 \cdot \delta \cdot \underline{\beta}^2 \cdot \underline{K}}$$

$$J_{sm} = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot m_1 (K_B \cdot N) I_1}{2p \cdot \delta} \quad (\text{pătura de curent inductoare})$$

Având determinate proiecțiile vectorului potențial magnetic, pe axele de coordonate, inducția magnetică \underline{B} se determină din

$$\underline{B} = \text{rot } \underline{A}.$$

Se obțin componentele inducției magnetice, după cele 3 axe, sub forma:

$$\underline{B}_x = J_{sm} \cdot \underline{m} \cdot \underline{\lambda} \cdot \left[e^{\lambda y} \left(\underline{K} - \frac{\alpha}{\underline{\beta}} \cdot \frac{\text{ch } \underline{\beta} z}{\text{sh } \underline{\beta} a} \right) + (e^{\alpha y} - e^{\lambda y}) \right] \cdot e^{j(\alpha x + s\omega t)} \quad (5.99)$$

$$\underline{B}_z = j J_{sm} \cdot \underline{m} \cdot \underline{\lambda} \cdot e^{\lambda y} \cdot \left(\frac{\text{sh } \underline{\beta} z}{\text{sh } \underline{\beta} a} - \frac{\text{sh } \lambda z}{\text{sh } \lambda a} \right) \cdot e^{j(\alpha x + s\omega t)} \quad (5.100)$$

$$\underline{B}_y = -j \cdot J_{sm} \cdot \underline{m} \cdot \alpha \cdot \left\{ e^{\lambda y} \cdot \left[\underline{K} + \left(\frac{\underline{\beta}}{\alpha} - \frac{\alpha}{\underline{\beta}} \right) \cdot \frac{\text{ch } \underline{\beta} z}{\text{sh } \underline{\beta} a} \right] + \frac{\lambda}{\alpha} \cdot (e^{\alpha y} - e^{\lambda y}) \cdot \frac{\text{ch } \lambda z}{\text{sh } \lambda a} \right\} \cdot e^{j(\alpha x + s\omega t)} \quad (5.101)$$

Cîmpul electric \underline{E} se obține din $\underline{E} = - \frac{\partial \underline{A}}{\partial t}$:

$$\underline{E}_x = -s\omega \cdot J_{sm} \cdot \underline{m} \cdot \left[e^{\lambda y} \cdot \frac{\text{sh } \underline{\beta} z}{\text{sh } \underline{\beta} a} + (e^{\alpha y} - e^{\lambda y}) \cdot \frac{\text{sh } \lambda z}{\text{sh } \lambda a} \right] \cdot e^{j(\alpha x + s\omega t)} \quad (5.102)$$

$$\underline{E}_y = js\omega J_{sm} \cdot \underline{m} \cdot (e^{\lambda y} - e^{\alpha y}) \cdot \frac{\text{sh } \lambda z}{\text{sh } \lambda a} \cdot e^{j(\alpha x + s\omega t)} \quad (5.103)$$

$$\underline{E}_z = j\omega \cdot J_{sm} \cdot \underline{m} \cdot e^{\lambda y} \left(-\frac{\alpha}{\beta} \cdot \frac{\operatorname{ch} \frac{\beta z}{a}}{\operatorname{sh} \frac{\beta a}{a}} + \underline{K} \right) e^{j(\alpha x + \omega t)} \quad (5.104)$$

Calculul forțelor.

Folosind tensorii lui Maxwell se calculează forța longitudinală și cea normală. Forța transversală este nulă magina fiind simetrică față de axa oy.

Forța longitudinală (forța ce are direcția axei OX) se calculează din:

$$F_x = \int_{-b}^b \int_0^{2p\tau} T_x \Big|_{y=0} \cdot dx \cdot dz \quad (5.105)$$

unde:

$$T_x = \frac{1}{\mu_0} B_{\delta y} \cdot B_{\delta x} \quad (\text{tensorul lui Maxwell după axa OX}).$$

Efectuând calculele se obține:

$$F_x = -\frac{j\alpha}{\mu_0} \cdot p \cdot \tau \cdot J_{sm}^2 |\underline{m}|^2 \cdot \operatorname{REAL} \left\{ \underline{\lambda}^* \left[2b \cdot |\underline{K}|^2 + \right. \right. \\ \left. \left. + \underline{K}^* \cdot \left(\frac{\beta}{\alpha} - \frac{\alpha}{\beta} \right) \cdot \frac{2 \operatorname{sh} \frac{\beta b}{a}}{\operatorname{sh} \frac{\beta a}{a}} - \underline{K} \cdot \frac{\alpha}{\beta} \cdot \frac{2 \cdot \operatorname{sh} \frac{\beta^* b}{a}}{\operatorname{sh} \frac{\beta^* a}{a}} - \right. \right. \\ \left. \left. - \left(\frac{\beta}{\beta^*} - \frac{1}{|\beta|^2} \right) \cdot \frac{\frac{1}{\beta_0} \cdot \operatorname{sh} 2\beta_0 b + \frac{1}{\beta_i} \sin 2\beta_i b}{\operatorname{ch} 2\beta_0 a - \cos 2\beta_i b} \right] \right\} \quad (5.106)$$

unde

$$\beta_0 = \operatorname{Re}(\beta)$$

$$\beta_i = \operatorname{Im}(\beta)$$

Forța normală fiind după direcția oy, expresia ei se obține prin integrarea tensiunii T_y pe suprafața indusului:

$$F_y = \int_{-b}^b \int_0^{2p\tau} T_y \Big|_{y=0} \cdot dx \cdot dz \quad (5.107)$$

Deoarece

$$T_y = \frac{1}{\mu_0} (B_{\delta y}^2 - B_{\delta x}^2 - B_{\delta z}^2)$$



se obține :

$$\begin{aligned}
 F_y = & \frac{p_0}{\mu} |J_{sm}|^2 \cdot |m|^2 \cdot \text{REAL} \left\{ |K|^2 \cdot 2b \cdot (\alpha^2 - |\lambda|^2) + \right. \\
 & + \frac{2 \operatorname{sh} \beta b}{\operatorname{sh} \beta a} \cdot K^* \cdot \alpha \left(1 - \frac{\alpha^2}{\beta^2} + \frac{|\lambda|^2}{\beta^2} \right) + \frac{2 \operatorname{sh} \beta^* b}{\operatorname{sh} \beta^* a} \cdot K \cdot \alpha \cdot \\
 & \cdot \left(1 - \frac{\alpha^2}{\beta^{*2}} + \frac{|\lambda|^2}{\beta^{*2}} \right) + \frac{2 \operatorname{sh} 2\beta_0 b}{\operatorname{ch} 2\beta_0 a - \cos 2\beta_i a} \cdot \frac{1}{2\beta_0} \cdot \\
 & \cdot \left[|\beta|^2 - |\lambda|^2 - \frac{\alpha^2}{|\beta|^2} \cdot 2 \cdot (\beta_0^2 + \beta_i^2 - \alpha^2 + |\lambda|^2) \right] + \\
 & + \frac{2 \sin 2\beta_i b}{\operatorname{ch} 2\beta_0 a - \cos 2\beta_i a} \cdot \frac{1}{2\beta_i} \left[|\beta|^2 + |\lambda|^2 - \frac{\alpha^2}{|\beta|^2} \cdot 2(\beta_0^2 + \beta_i^2 - \alpha^2 + |\lambda|^2) \right] \\
 & + \frac{2 \operatorname{sh} b (\lambda + \beta^*)}{\operatorname{ch} a(\lambda + \beta^*) - \operatorname{ch} a(\lambda - \beta^*)} \cdot \frac{1}{\lambda + \beta^*} \cdot |\lambda|^2 - \\
 & - \frac{2 \operatorname{sh} b (\lambda - \beta^*)}{\operatorname{ch} a(\lambda + \beta^*) - \operatorname{ch} a(\lambda - \beta^*)} \cdot \frac{1}{\lambda - \beta^*} \cdot |\lambda|^2 + \\
 & + \frac{2 \operatorname{sh} b (\beta + \lambda^*)}{\operatorname{ch} a(\beta + \lambda^*) - \operatorname{ch} a(\beta - \lambda^*)} \cdot \frac{1}{\beta + \lambda^*} \cdot |\lambda|^2 - \\
 & - \frac{2 \operatorname{sh} b (\beta - \lambda^*)}{\operatorname{ch} a(\lambda + \beta^*) - \operatorname{ch} a(\lambda - \beta^*)} \cdot \frac{1}{\beta - \lambda^*} \cdot |\lambda|^2 - \\
 & - \left. \frac{\operatorname{sh} 2b \lambda_0}{\operatorname{ch} 2a\lambda_0 - \cos 2a\lambda_i} \cdot \frac{1}{\lambda_0} |\lambda|^2 + \frac{\sin 2b \lambda_i}{\operatorname{ch} 2a\lambda_0 - \cos 2a\lambda_i} \cdot \frac{1}{\lambda_i} |\lambda|^2 \right\}
 \end{aligned}$$

(5.108)

Calculul parametrilor indusului.

Folosind ecuațiile (5.99- 5.101) se calculează fluxurile în direcțiile axelor OX, OZ.

Fluxul, ϕ_x , pe unitatea de lățime se determină prin integrarea lui B_x , obținându-se:

$$\phi_x = \int_0^{-\infty} B_x \cdot dy = J_{sm} \cdot \underline{m} \cdot \left(\frac{\lambda}{\alpha} \cdot \frac{\text{ch } \lambda z}{\text{sh } \lambda a} - \frac{\alpha}{\beta} \cdot \frac{\text{ch } \beta z}{\text{ch } \beta a} + K \right) e^{j(\alpha x + \omega t)} \quad (5.109)$$

În mod analog se calculează și ϕ_z :

$$\phi_z = \int_0^{-\infty} B_z \cdot dy = -j \cdot J_{sm} \cdot \underline{m} \cdot \left(\frac{\text{sh } \beta z}{\text{sh } \beta a} - \frac{\text{sh } \lambda z}{\text{sh } \lambda a} \right) e^{j(\alpha x + \omega t)} \quad (5.110)$$

Cu ajutorul relațiilor (5.109 - 5.110) se calculează tensiunea indusă în secundar, obținându-se expresia:

$$\underline{U}_e = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot a \cdot (K_B N) \cdot (\omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \int / s)^{1/2} \cdot \left(\frac{H_0}{\alpha a} + A_1 \cdot \sqrt{H_0} \right) \quad (5.111)$$

unde:

H_0 - intensitatea cîmpului magnetic la suprafața indusului calculată cu relația:

$$H_0 = \frac{|J_{sm} \cdot \underline{m}|}{4 \left(1 - \frac{\alpha}{2 \cdot \beta_0^2} \cdot a + \frac{\mu}{\beta_0} \cdot \text{cth } \beta_0 a \right)} \cdot |\lambda| \cdot \sqrt{\frac{10 \cdot B_g}{\mu}}$$

$$A_1 = \frac{3 \pi \cdot \sqrt{1 + \frac{\alpha}{\beta_0} \text{cth } \beta_0 a}}{\beta_0 = \text{REAL}(\underline{\beta})}$$

Inducția B_g corespunde intensității cîmpului magnetic H_0 și se găsește din curba de magnetizare a materialului feromagnetic. Alegerea permeabilității magnetice relative, μ_r , se face în funcție de H_0 [Bl].

La o variație a inducției între 0,2 + 2T, permeabilitatea magnetică relativă μ_r ia valori cuprinse în dome-

niul: $\mu_r = 820 + 300j$.

Se folosește, la determinarea parametrilor maginii, schema echivalentă dată în fig. 5.17.

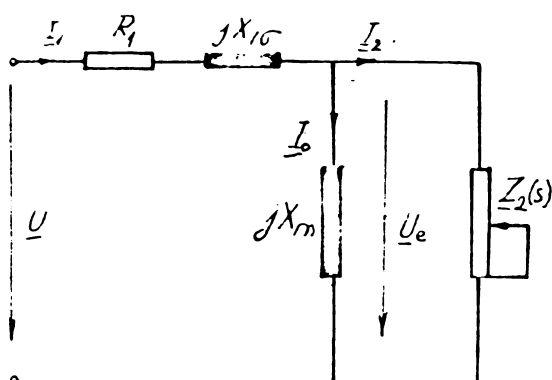


Fig. 5.17. Schema echivalentă paralel.

$Z_2(s)$ - impedanța, redusă la inductor, a indusului feromagnetic.

Impedanța indusului feromagnetic se calculează folosind relația:

$$Z_2(s) = \frac{U_e^2 \cdot m_1}{S^*} \quad (5.112)$$

unde S^* - conjugata puterii aparente, scrisă în complex, calculată prin integrarea vectorului Poynting pe suprafața indusului.

Folosind relația de mai sus, se obține admitanța indusului sub forma:

$$Y_2(s) = \frac{1}{Z_2(s)} = \frac{\sqrt{s \cdot p \cdot \delta_0} \cdot (A_2 \cdot H_0 \cdot C_1 + A_3 \cdot \sqrt{H_0^3 \cdot C_2})}{4 \cdot m_1 \cdot (K_B N)^2 \cdot a \cdot \sqrt{\omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \beta} \cdot \sqrt{H_0} \cdot \left(\frac{\sqrt{H_0}}{\alpha \cdot a} + A_1 \right)^2} \cdot Q \quad (5.113)$$

unde A_2, A_3 sînt funcții de μ_r :

$$A_2 = \frac{4}{3\pi} \cdot \sqrt{\frac{10 \cdot B_s}{\mu_0 \cdot \mu_r} \left(1 + \frac{\alpha}{\beta_0} \cdot \text{cth} \beta_0 a \right)} \cdot \left[1 - \frac{3\alpha}{\beta_0^2 (2a)} + \frac{\alpha}{\beta_0} \cdot \text{cth} \beta_0 a \right]$$

$$A_3 = \frac{1}{2} (1 - \text{cth}^2 \beta_0 a) + \frac{1}{\beta_0 \cdot (2a)} \cdot \text{cth} \beta_0 a + \frac{1}{\alpha \cdot a}$$

$$K_1 = \text{cth} \frac{\lambda}{\beta} b + \frac{\alpha}{\beta} \text{cth} \beta b$$

$$Q = \frac{(K_1 \cdot \beta^2 \cdot b - \alpha) \alpha}{(\beta^2 - \alpha^2 + K_1 \cdot \alpha \cdot \beta^2 \cdot b)}$$

$$\underline{C}_1 = e^{-j26,6^\circ} \quad ; \quad \underline{C}_2 = e^{-j,45^\circ} \quad ;$$

In expresia admitanței indusului, factorul Q este determinat de efectul transversal, fiind egal cu unitatea la o lățime a indusului infinită.

Cunoscând parametrii indusului din schema paralel se calculează ușor impedanța echivalentă, a ansamblului indus-întrefier, putându-se folosi astfel cunoscuta schemă echivalență serie a M.L.(fig.5.13).

$$\underline{Z}_e = \frac{j X_m}{1 + j X_m \cdot \underline{Y}_2(s)} \quad (5.114)$$

In final se ajunge la expresia:

$$\underline{Z}_e = \frac{4 \sqrt{3} \cdot \mu_0 \cdot \omega \cdot \zeta \cdot m_1 (K_B N)^2 \cdot a \cdot \sqrt{\mu_r \cdot \rho} \cdot \left(\frac{\sqrt{H_0}}{\alpha \cdot a} + \Lambda_1 \right)^2}{p \cdot \zeta^2 \cdot \sqrt{\mu_0 \cdot \omega \cdot s} (\Lambda_2 \cdot \sqrt{H_0 \cdot \underline{C}_1} + \Lambda_3 \cdot H_0 \cdot \underline{C}_2) \cdot Q - j \pi^2 \cdot p \cdot \delta \cdot \sqrt{\mu_r \cdot \rho} \cdot \left(\frac{\sqrt{H_0}}{\alpha \cdot a} + \Lambda_1 \right)}$$

(5.115)

Din bilanțul puterilor se poate calcula forța longitudinală:

$$F_x \cdot V_n = 3 \cdot R_e(\underline{Z}_e) \cdot \underline{I}_1^2 \quad (5.116)$$

unde

$$V_n - \text{viteza de sincronism } (V_n = 2 \cdot \zeta \cdot f).$$

Calculul tensiunii la borne, a randamentului și a factorului de putere.

Tensiunea \underline{U} , la bornele mașinii, se calculează folosind impedanța totală $\underline{Z} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_e$, unde $\underline{Z}_1 = R_1 + j X_{1G}$ se află pe baza relațiilor cunoscute

$$\underline{U} = \underline{I}_1 \cdot (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_e) \quad (5.117)$$

Randamentul mașinii:

$$\eta = \frac{F_x \cdot V}{3 \cdot I_1^2 \cdot R_e(\underline{Z})} \quad (5.118)$$

Factorul de putere:

$$\cos \varphi = \frac{R_e(\underline{Z})}{|\underline{Z}|} \quad (5.119)$$

In concluzie, metoda analitică expusă dă rezultate satisfăcătoare într-o limită largă a solicitărilor magnetice și deci se pretează la calculul M.L. de viteze mici și medii (unde efectul longitudinal are o importanță scăzută).

Calcululele se pot efectua și fără sisteme automate de calcul și în general, relațiile sînt ușor utilizabile.

Cap. VI.

REZULTATE EXPERIMENTALE SI APLICATIVE.

VI.1. Incercări experimentale în regim dinamic la M.L.U.

Pentru verificarea principalelor rezultate teoretice au fost efectuate încercări în regim dinamic pe un prototip de M.L. executat în acest scop.

Datele mașinii sînt:

$$\sigma = 0.132 \text{ m (pasul polar)}$$

$$W = 32 \text{ spire/bobine (numărul de spire pe bobină)}$$

$$2p + 1 = 7 \text{ (numărul de poli)}$$

$$f = 50 \text{ Hz; } Q = 1.; \delta = 0.0055 \text{ m (întrefirul mecanic)}$$

$$L = 2c = 0.075 \text{ m (lățimea indusului = lățimea inductorului).}$$

VI.1.1. Instalația experimentală.

Standul experimental se poate vedea în fig. 6.1.

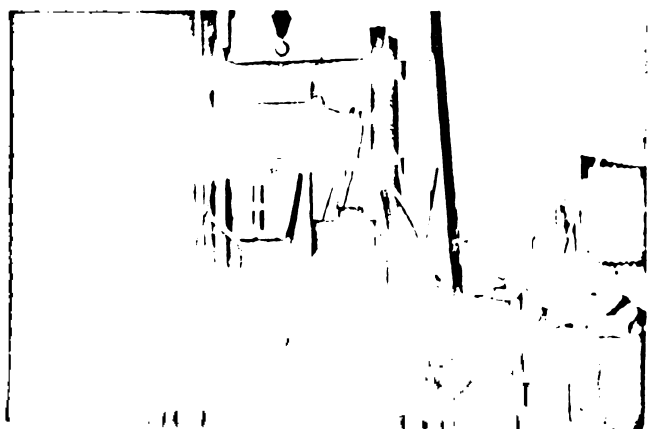


Fig.6.1. Vedere generală a standului de încercări în regim dinamic a M.L.U. și a F.L.

Inductorul este de tip arc, modelând astfel funcționarea M.L.U. în regim dinamic.

Indusul este o roată de locomotivă "Pacific", având diametrul de 1800 mm.

Frînarea se face cu un generator de curent continuu care transformă energia în rețeaua de c.c. a laboratorului.

Între generatorul de c.c. și Indus se află o cutie de viteze cu 4 trepte de viteză.

Modelul experimental permite determinarea practică a caracteristicii mecanice în toată plaja alunecărilor 0 + 1.

Încercările experimentale s-au făcut la un întrefier de 5,5 mm.

Forțele au fost măsurate prin folosirea unor doze hidraulice, iar inducția din întrefier prin bobine sondă cu 50 spire.

Probetele s-au făcut la un curent de alimentare constant și alunecare variabilă (obținută prin încărcarea generatorului de c.c. cuplat mecanic cu indusul M.L.U.).

S-au folosit, la obținerea rezultatelor teoretice, programele de calcul concepute pe baza relațiilor de la cap.II.

VI.1.2. Rezultate experimentale.

Rezultatele experimentale privind forța longitudinală, sînt date în fig. 6.2.

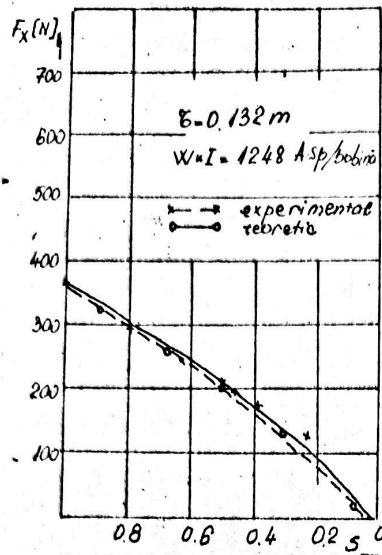


Fig.6.2. Caracteristicile forței longitudinale.
 $W \cdot I$ - solenația primară pe o bobină.
 W - numărul de spire pe o bobină.
 I - curentul primar pe fază.

Variația forței normale cu alunecarea este dată în fig.6.3. Cu creșterea vitezei, forța normală crește, atingând maximum la sincronism, aceasta datorită curenților induși care generează o forță de levitație de sens invers forței de atracție.

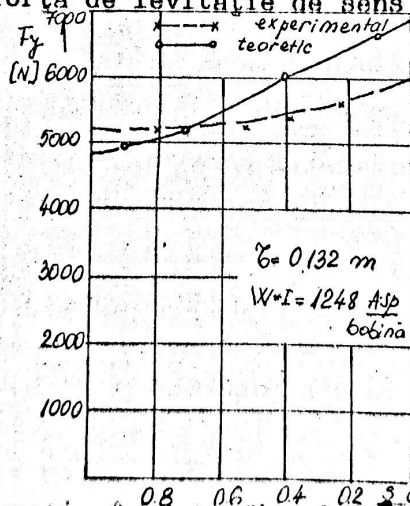


Fig.6.3. Forța normală în funcție de alunecare.

Cîmpul magnetic în interiorul mașinii, după lățime, a fost măsurat folosind 4 bobine sondă dispuse corespunzător.

Curba inducției pe semilățimea mașinii este dată în fig.6.4.

Rezultatele experimentale diferă, în general, cu mai puțin de 9% față de rezultatele teoretice, aceasta demonstrînd valabilitatea ipotezelor de calcul.

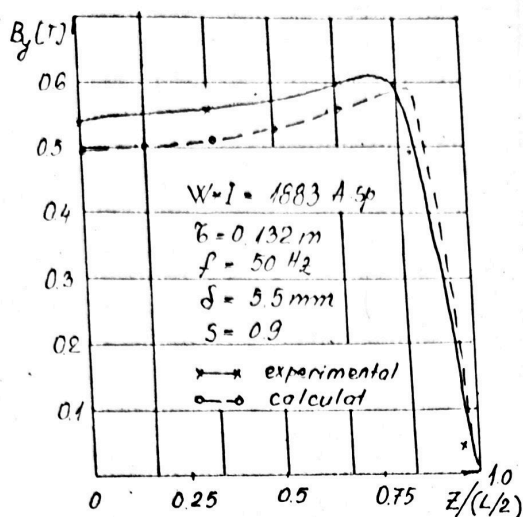


Fig. 6.4. Repartiția
cîmpului magnetic pe
lățime.

B_y - componenta normală
a cîmpului în întrefier,
la suprafața
inductorului.

VI.1.3. Incercări experimentale în regim dinamic la F.L.

Teoria F.L. expusă la cap. IV a fost verificată pe o F.L. construită special în acest scop. Standul experimental este același ca cel dat în fig. 6.1.

Datele constructive ale F.L. din fig. 6.5. sînt:

$\tau = 0.12$ m - pasul polar.

$2p = 8$; $2a = 0.075$ m - lățimea inductorului

$\delta = 0.008$ m - întrefierul

$\sigma_{Fe} = 0.33 \times 10^7$ [$\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$]; $d_1 = d_2 = d_3 = d_4 = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m.

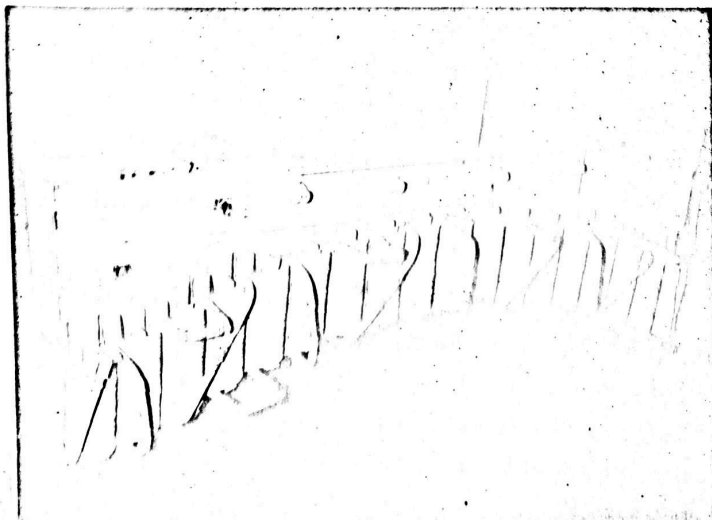


Fig. 6.5. Frînă
liniară-model
experimental

FL - 01

(inductorul cu
bobinele de exci-
tație)

Armonicile considerate :

- pe lungime $\gamma = 1, 3, 5, 7, 9$.
- pe lățime $n = 1, 3, 5, 7$.

Iterația, pentru aflarea permeabilităților a fost convergentă rapid pentru un coeficient de subrelaxare $\beta = 0.9$.

Rezultatele experimentale comparate cu cele teoretice sînt date în fig.6.6.

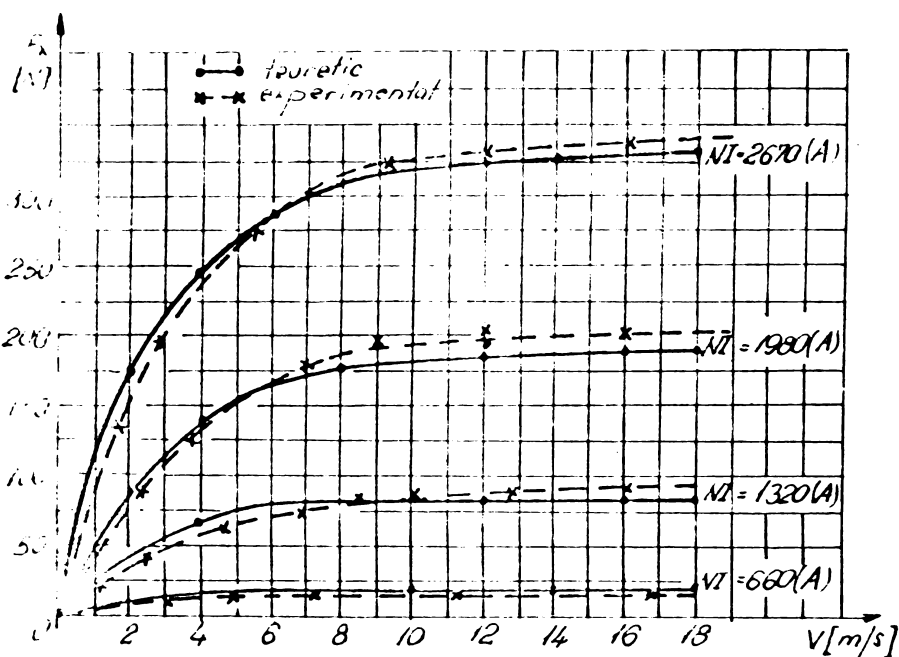


Fig.6.6. Variația forței de frinare cu viteza.

Se observă o concordanță satisfăcătoare între rezultatele teoretice și cele experimentale ceea ce confirmă folosirea teoriei expuse.

Aliura curbelor obținute $F_x = f(V)$, la NI-parametru în zona vitezelor ridicate se explică printr-un efect pelicular și de saturație pronunțat.

O influență pronunțată o are și efectul longitudinal în special la viteze ridicate ($V > 100$ Km/h), așa cum rezultă din fig. 6.7, unde s-au reprezentat curbele experimentale obținute în [P9] la încercările efectuate pe căile ferate franceze (S.N.C.F.) și comparativ cu ele sînt date și curbele teoretice obținute din teoria prezentată.

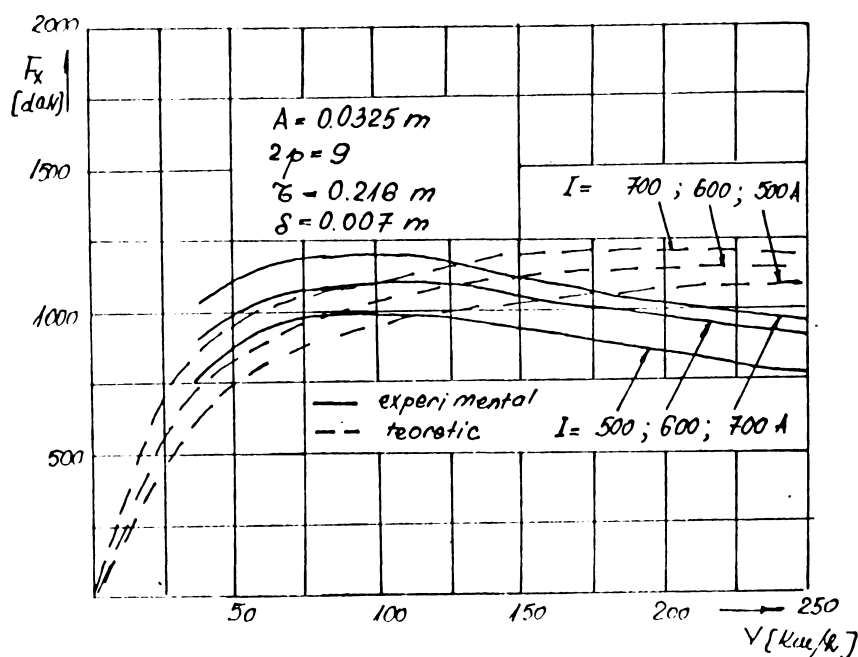


Fig.6.7. Rezultate obținute având în vedere căile ferate franceze.

- șina are lățimea de 0,065 m.

Programele de calcul sînt date în Anexa 3. Timpul de calcul, pentru ridicarea unei caracteristici mecanice pe un calculator FELIX C-256, este de ordinul a 20', fiind funcție de precizia impusă determinării permeabilităților magnetice folosite în teoria straturilor.

Deosebiri importante între teorie și experiență (erori de pînă la 20%) apar la viteze mari ($v > 250 \text{ km/h}$) unde efectul longitudinal este important. O evaluare a efectului longitudinal este posibilă prin considerarea unei a treia serii Fourier, în care caz timpul de calcul este exagerat de mare (de ordinul orelor).

VI.2. Incercări experimentale în regim static la M.L.U.

În regim de scurtcircuit ($S = 1$) s-au încercat două prototipuri de M.L.U.

Cele două prototipuri au fost plasate pe două șan-duri de încercări.

VI.2.1. Standul de încercări I.

Inductorul M.L.U. este fix și indusul mobil (fig.6.8).

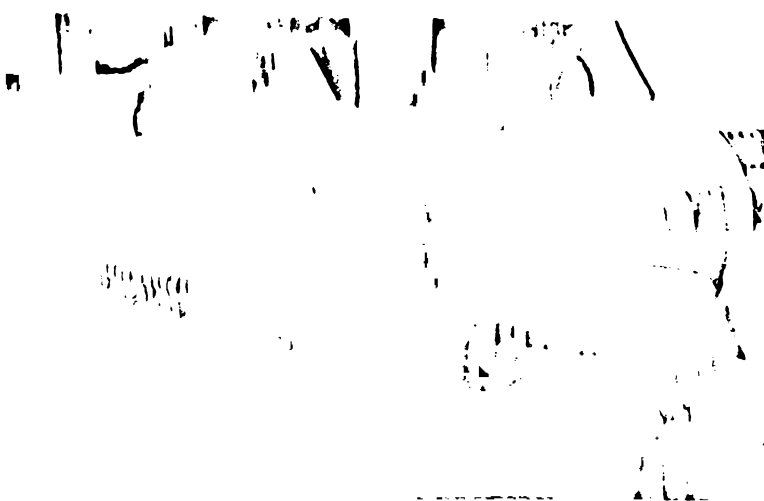


Fig.6.8. Stand de încercări I.

M.L. are inductorul construit în două variante:
- cu creștături semifinchise-varianta I;
- cu creștături deschise-varianta II; (fig.6.9)

Datele mașinii sînt:

$$r = 0,078 \text{ m}$$

$$2a = 0,185 \text{ m}$$

$$p = 9; 2b = 0,24 \text{ m}$$

$$K_B \cdot N_1 = 102 \text{ ap}$$

$$N_c = 57 \text{ crest.}$$

$$\rho_{Fe} = \frac{1}{\sigma} = 0,33 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{m.}$$

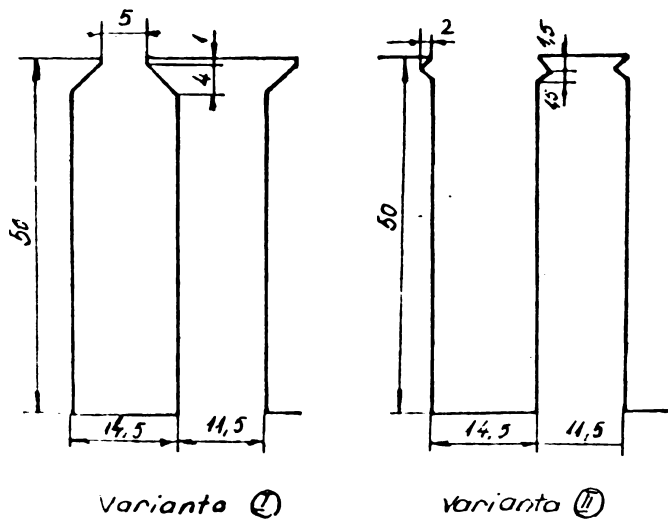


Fig.6.9. Schița tolei, în cele 2 variante ale M.L. construit pentru C.M.N. Deva.

Încercările s-au efectuat în montaj autocompensat eliminîndu-se astfel efectul temperaturii. Pentru măsura forțelor s-au folosit timbre tensometrice plasate pe profilele de susținere

ne M.J. Schema bloc a sistemului de măsurare este dată în fig. 6.10.A.

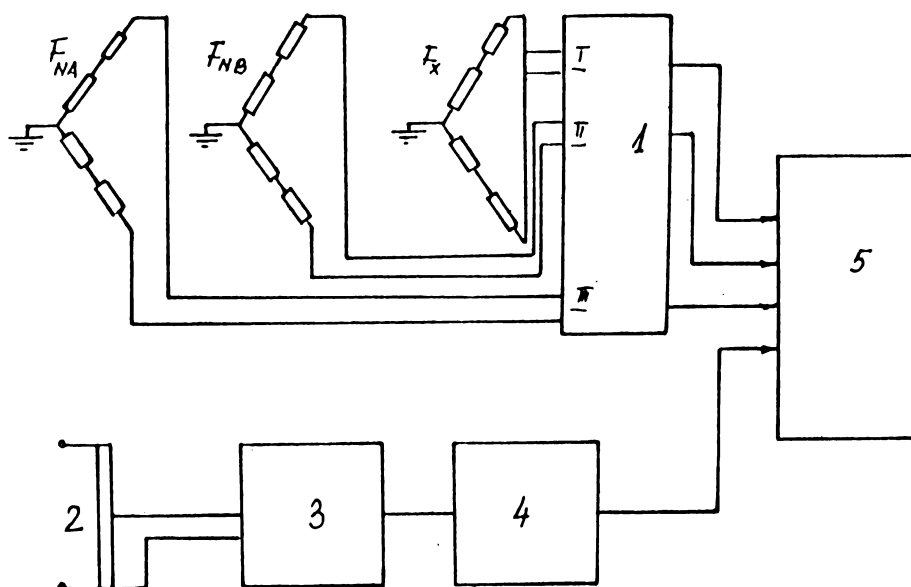


Fig.6.10.A. Schema principală de măsură.

Montajul este compus din:

1. Punte tensometrică cu 3 canale UM131.
2. Șunt de 200 A/75 mV.
3. Voltmetru electronic tip 2625 cu o impedanță de intrare de 1 MΩ și ieșire în c.c.
4. Filtru trece jos - KF 103, fixat la frecvența de tăiere de 5,6 Hz.
5. Oscilograf cu buclă tip 8LS-1.

F_{NA} - forța normală în reazemul A

F_{NB} - forța normală în reazemul B.

F_x - forța longitudinală.

Oscilografierea mărimilor este dată în fig.6.10.B.

Rezultatele sînt prezentate în fig. 6.11; 6.12; 6.13.

Relațiile de calcul folosite au fost cele de la paragraful V.3.

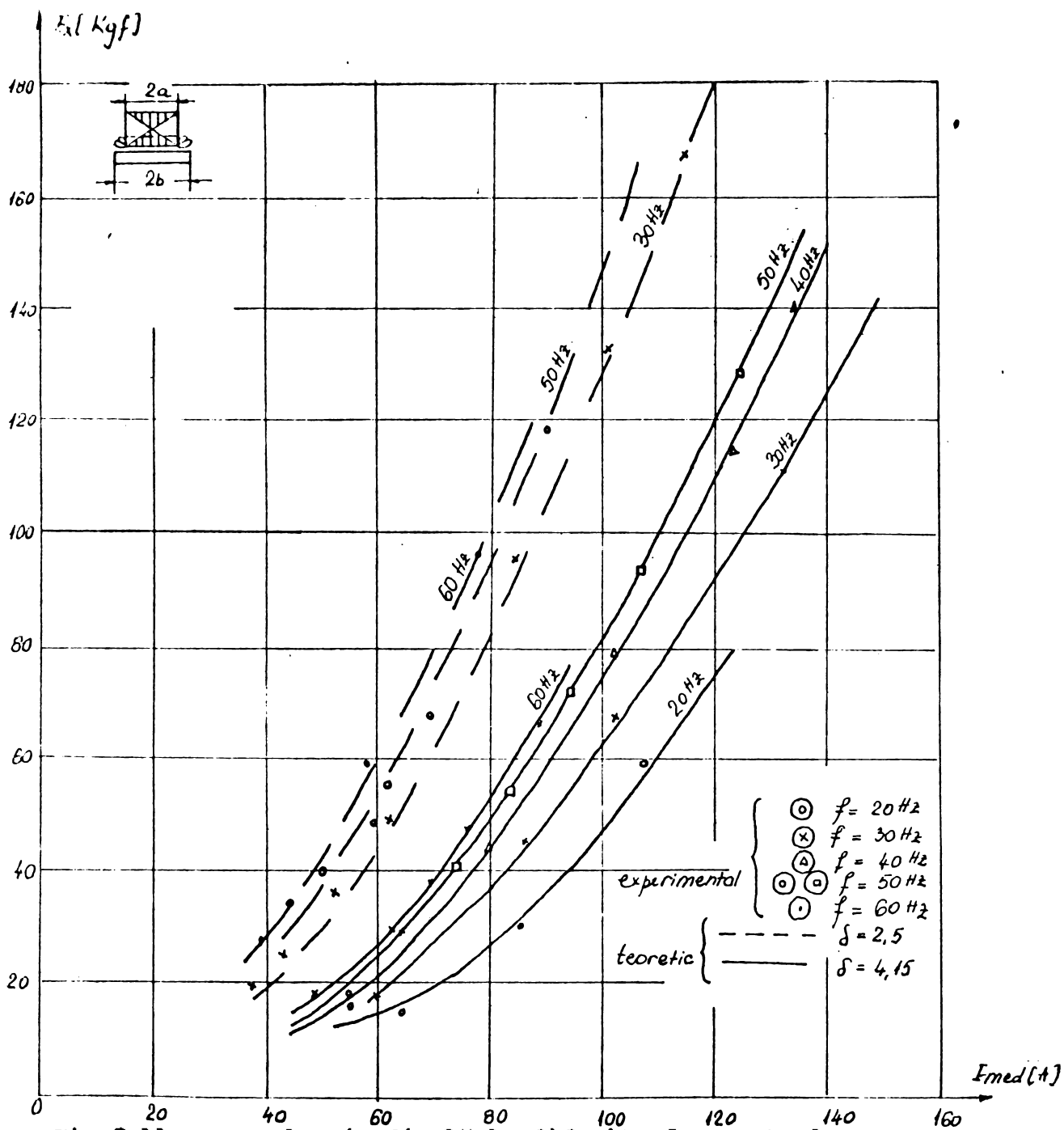
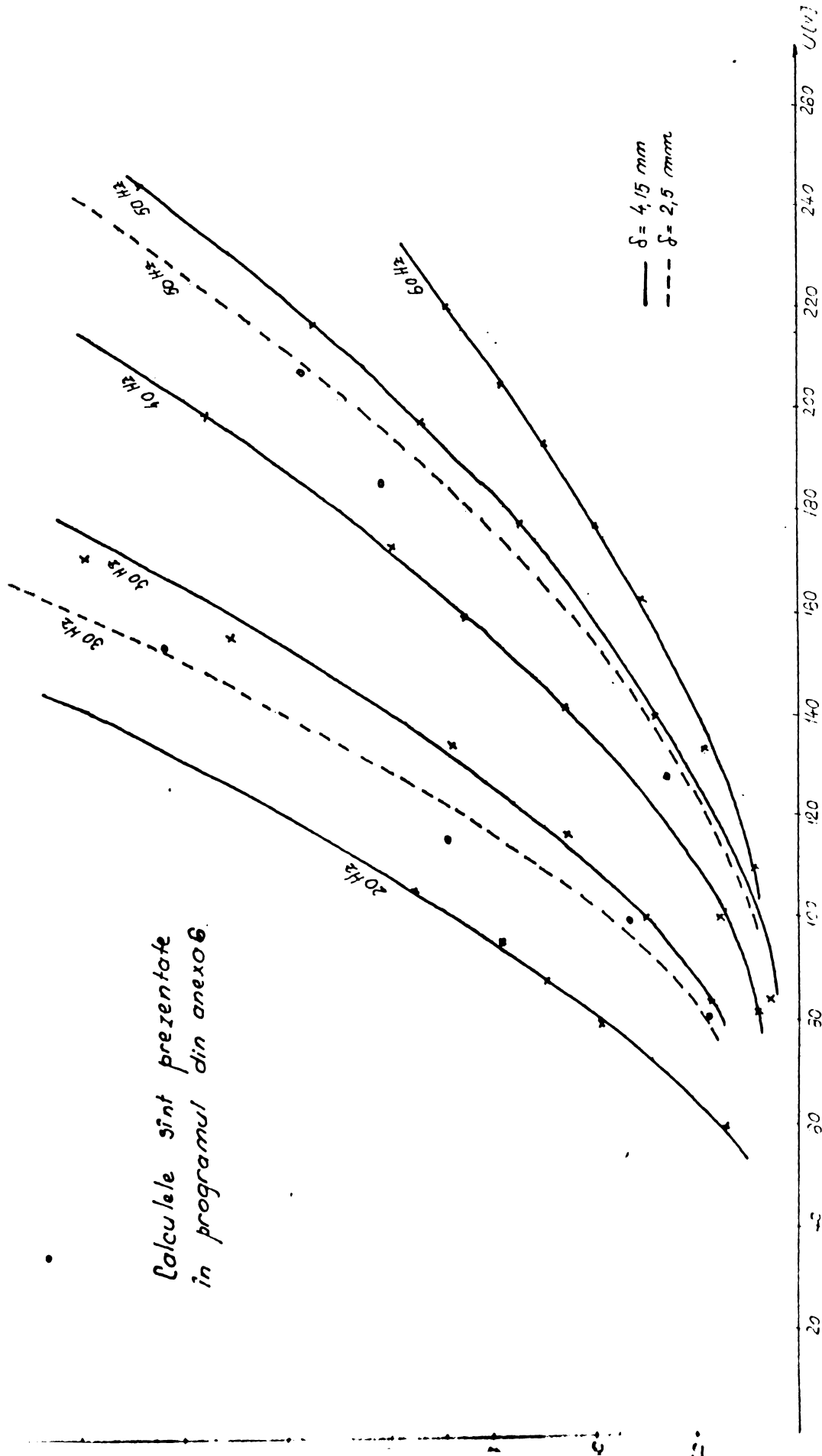


Fig.6.11. Forța longitudinală la diferite frecvențe de alimentare.



Calculule sînt prezentate
în programul din anexo 6.

Fig. 6/12

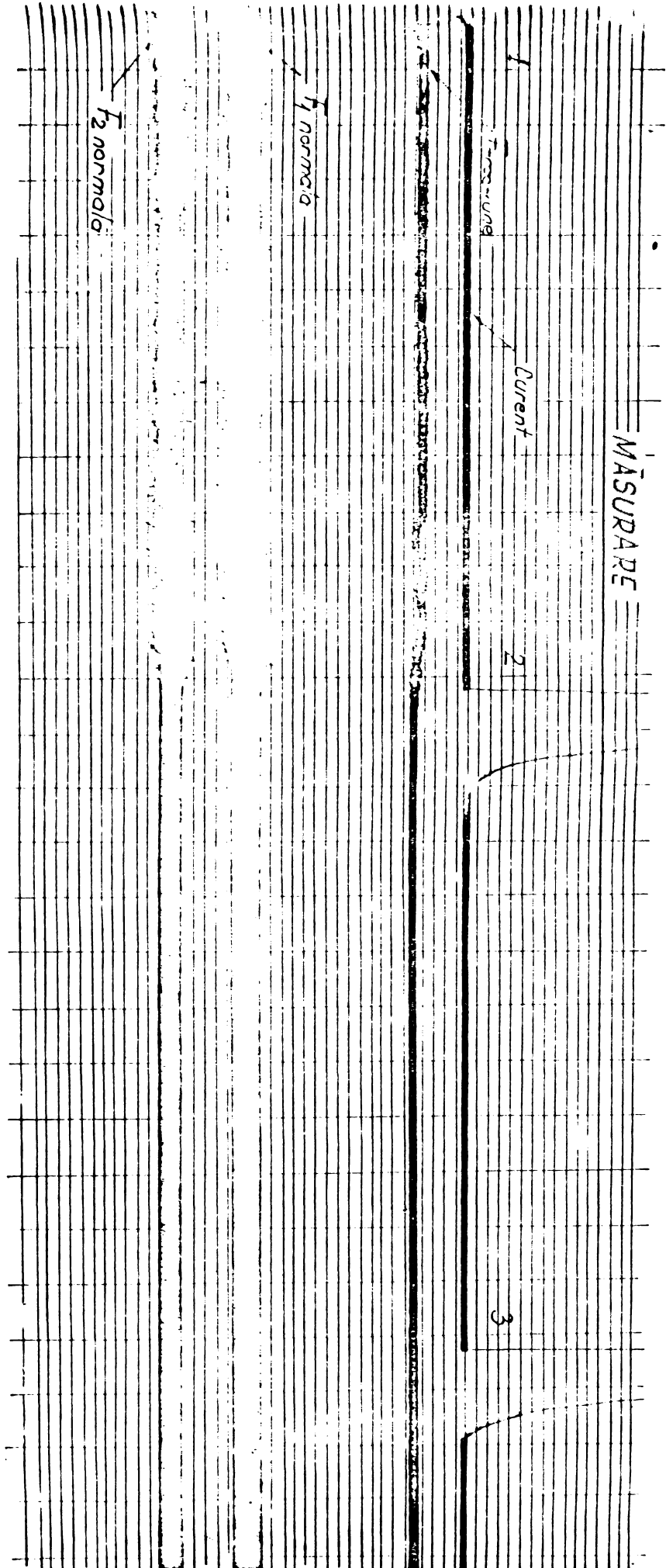


Fig. 6.10. B. Inregistrarea în timp a curentului și a forțelor ;
 (1, 2, 3 impulsuri de citire pentru tensiune putere, cimp în întrefi

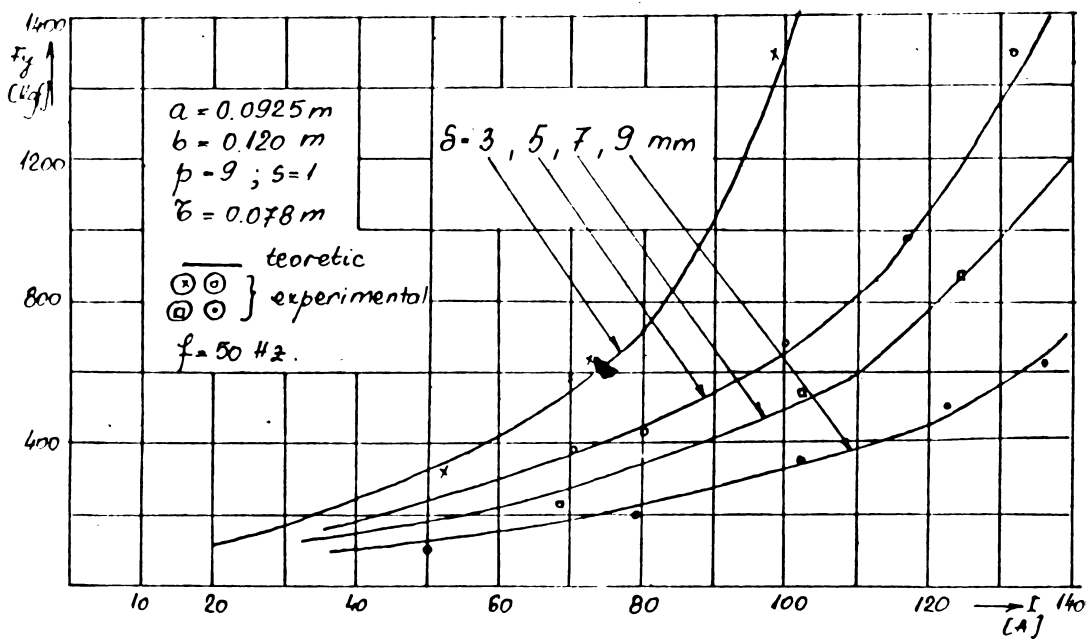


Fig.6.13. Forța normală în funcție de curentul de alimentare.

In fig.6.14 este dată variația forței longitudinale cu frecvența de alimentare la curent constant ($I = 120$ A).

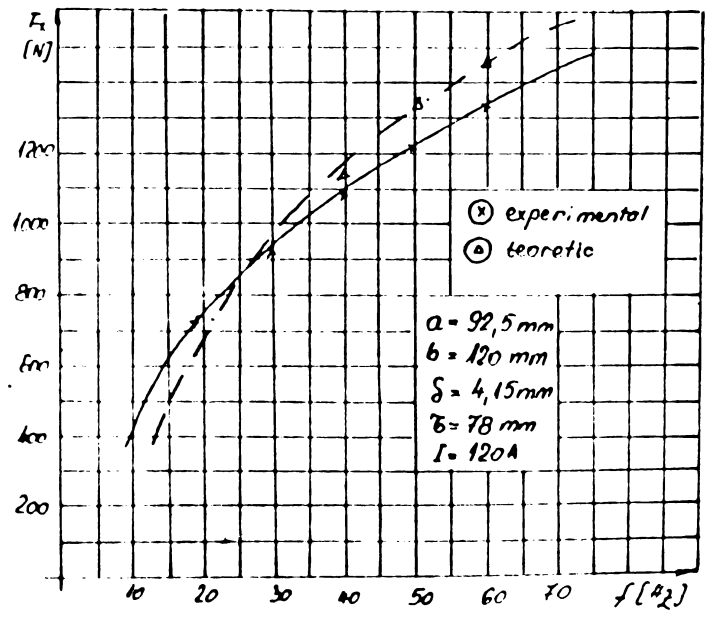


Fig.6.14. Variația forței longitudinale cu frecvența de alimentare.

In fig. 6.15 s-a făcut o verificare intermediară a metodei simplificate V.3, comparându-se valorile calculate ale inducției normale din întrefier la suprafața indusului, cu cele măsurate experimental.

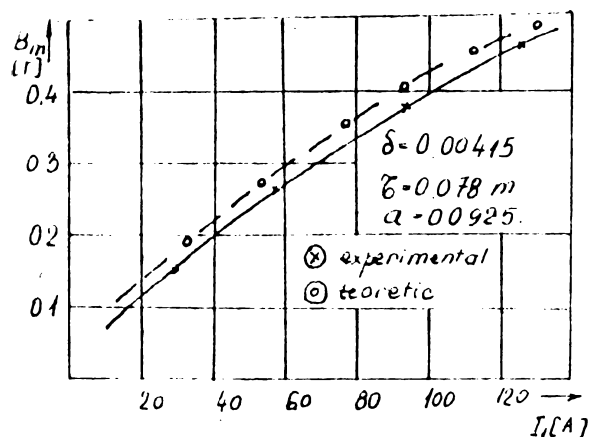


Fig. 6.15. Cîmpul din întrefier la suprafața indusului, în funcție de curentul primar de alimentare.

Modificarea parametrilor ansamblului indus-întrefier în funcție de curentul din primar este dată în fig. 6.16.

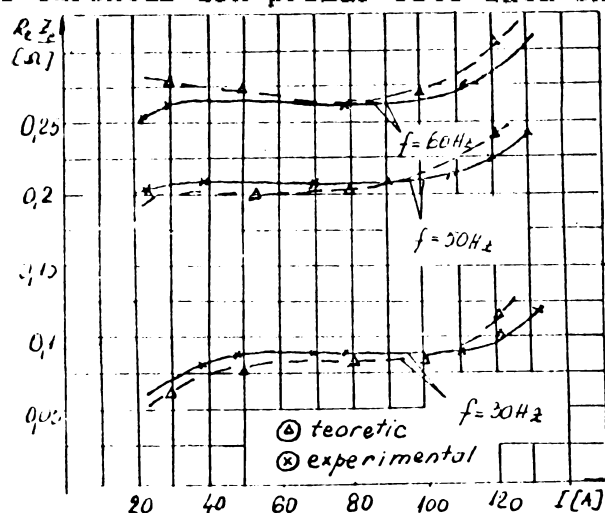


Fig. 6.16. Modificarea rezistenței ansamblului indus-întrefier cu curentul de alimentare.

Se observă că partea reală a impedanței echivalente indus-întrefier, se menține constantă pentru un domeniu de variație destul de mare pentru curent. Pentru acest domeniu rezultatele obținute prin calcul sînt foarte apropiate de cele experimentale.

La solicitări magnetice puternice, valorile experimentale sînt sub cele teoretice, aceasta datorită, modelului teoretic prezentat la paragraful V.3 care a supraevaluat efectul de saturație în indus.

VI.2.2. Standul de încercări II.

Inductorul M.L. (fig. 6.17) are următoarele date

$2a = 0.255$ m - lățimea inductorului.

$$\begin{aligned} \tau &= 0.25 \text{ m} ; p = 3; q = 3; r_1 = 0.367 \Omega \\ x_1 &= 0.044 \Omega \quad \text{la } \delta = 0.0078 \text{ m.} \end{aligned}$$

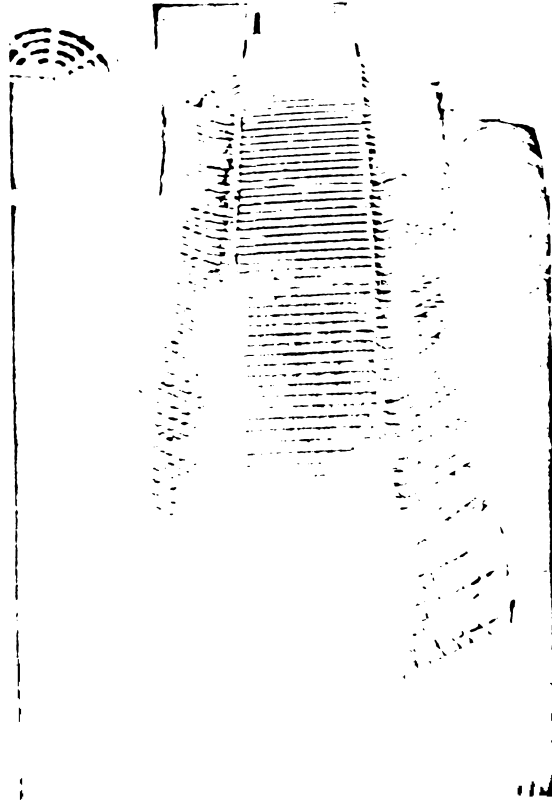


Fig.6.17. M.L. de medie viteză(inductorul) - prototip executat la Electromotor - Timișoara - ML-03-EMT (echipează vehiculul experimental cu M.L.pe o cale de rulare de 200 m).

S-a determinat experimental caracteristica forței longitudinale în funcție de curentul de alimentare și s-a comparat cu valorile calculate obținute prin metoda straturilor (capitolul II) și printr-o metodă simplificată (paragraful V.1) (fig.6.18).

Concordanța experiment-calcul este satisfăcătoare.

În concluzie, rezultatele experimentale obținute pe cele 3 prototipuri de M.L.U. și un prototip F.L. confirmă ipotezele de calcul admise și demonstrează valabilitatea rezultatelor teoretice la calculele ingineresti.

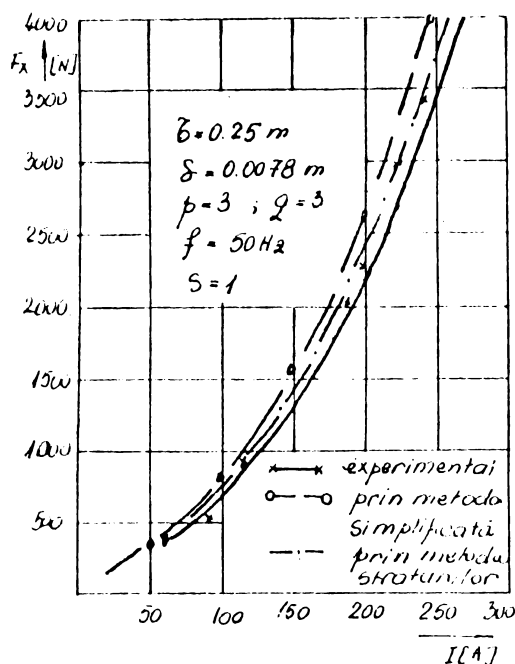


Fig.6.18. Caracteristica forței longitudinale în regim static.

- I_1 - curentul de alimentare

F_x - forța longitudinală

VI.3. Exemplu numeric privind calculul optimal al M.L.U.

Se prezintă un exemplu de calcul avînd în vedere cele două criterii de optimizare.

VI.3.1. Criteriul de optimizare A ($\eta \cdot \cos \varphi$ - maxim).

Optimizarea M.L.U., în acest caz, constă în determinarea următoarelor mărimi:

- S_{opt} - alunecarea nominală optimă;
- f_{opt} - frecvența optimă de alimentare;
- d_{Al} - grosimea optimă a plăcii de aluminiu din indus;
- ζ - pasul polar al mașinii;
- p - numărul optim de perechi de poli.

la $\eta \cdot \cos \varphi$ maxim

Calcululele de optimizare au în vedere o aplicație concretă dată, în cazul de față o M.L.U. de mare viteză, cu datele:

δ - întrefierul impus din considerente mecanice
($\delta = 10$ mm)

F_N - forța longitudinală ($F_N = 8000$ N)

V_N - viteza de regim ($V_N = 80$ m/s)

$2c$ - lățimea inductorului ($2c = 0.2$ m);

L - lățimea indusului ($L = 0.34$ m)

$d_{FE} = d_1 + d_2 + d_3 + \dots + d_u$ - grosimea plăcii feromagnetice ($d_{Fe} = 15$ mm) dată de adâncimea de pătrundere în mediul masiv feromagnetic.

La forța longitudinală dată și la o încărcare de aproximativ $1,4\text{N/cm}^2$, rezultă o lungime a mașinii de:

$$(2p + 1)Z = 2,82 \text{ m} \quad (6.1)$$

Relația 6.1 dă legătura dintre "p" și "Z". În continuare se prezintă ordinoograma programului de calcul folosit la optimizarea M.L. unilateral de inducție cu indus Al-Fe.

Calcululele au fost conduse astfel:

- la frecvența $f = 80$ Hz, s-au trasat curbela $\eta \cdot \cos \varphi$ la diferite grosimi ale plăcii de aluminiu ca parametru (fig.6.20) și apoi maximele curbelor s-au reprezentat funcție de grosimea aluminiului (fig.6.21), obținându-se grosimea optimă: $d_{Al \text{ opt}}$.

La grosimea aluminiului $d_{Al} = d_{Al \text{ opt}}$, se reprezintă $\eta \cdot \cos \varphi$ funcție de alunecarea s , rezultând alunecarea optimă: s_{opt} (fig.6.22) corespunzătoare valorii maxime a produsului: $\eta \cdot \cos \varphi$.

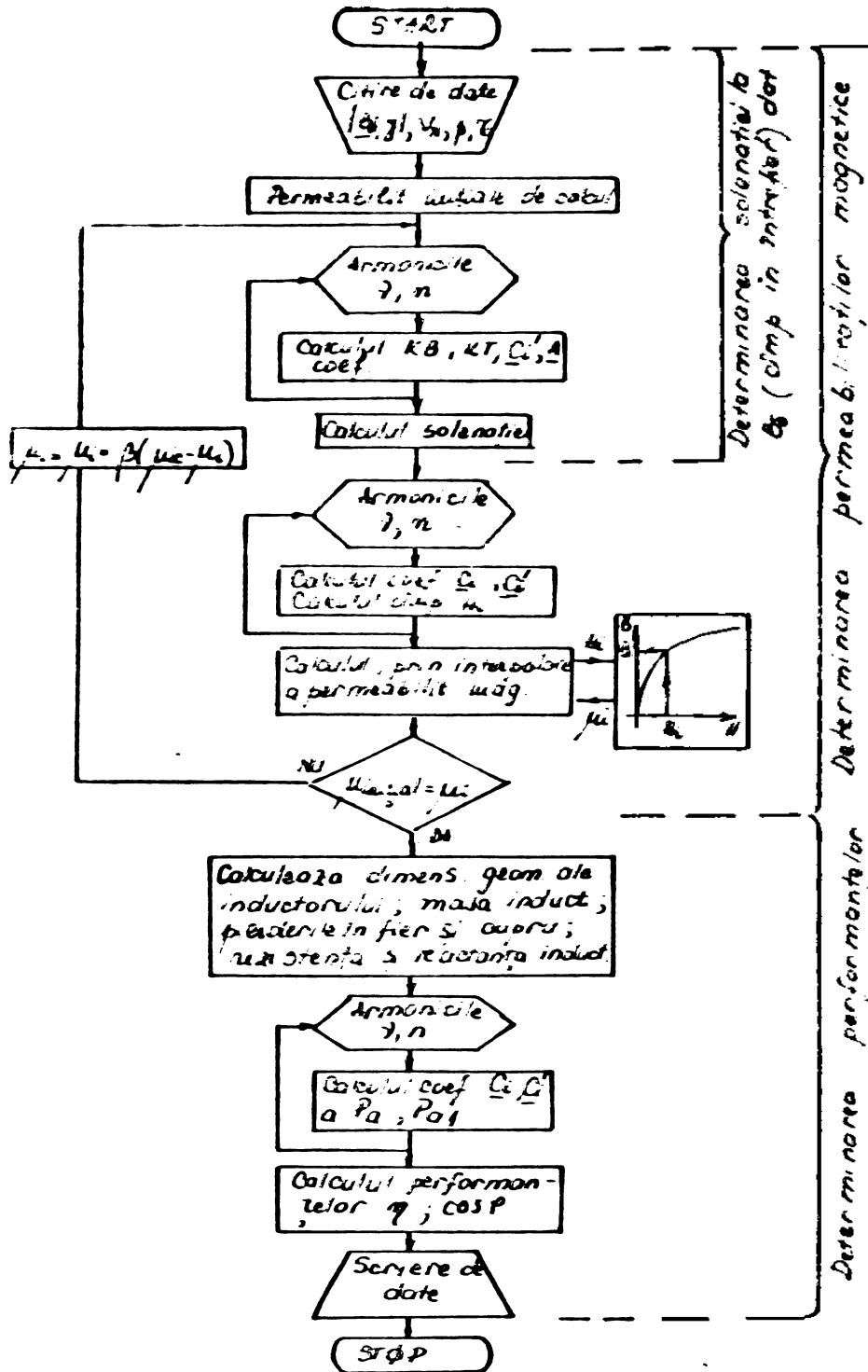


Fig.6.19. Ordinograma de calcul.

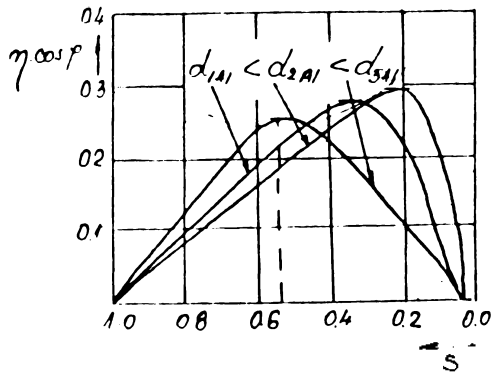


Fig.6.20. Variația produsului $\eta \cdot \cos \varphi$ cu alunecarea.
 $d_{1Al} = 3 \text{ mm}$; $d_{2Al} = 6 \text{ mm}$;
 $d_{3Al} = 11 \text{ mm}$.

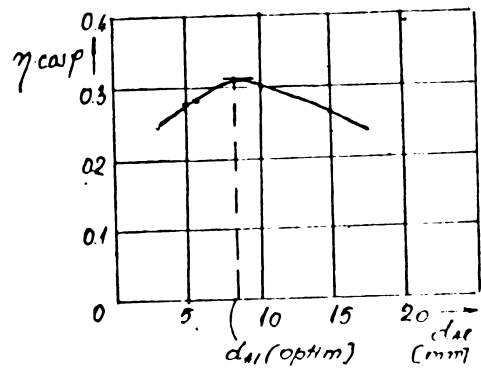


Fig.6.21. Determinarea grosimii optime a plăcii de aluminiu.

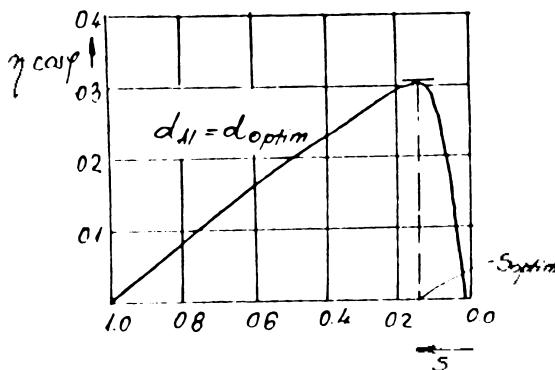


Fig.6.22. Determinarea alunecării optime la o grosime optimă pentru placa de aluminiu a indusului.

În acest fel s-au determinat, pentru frecvența de 80 Hz, următoarele mărimi:

- s_{opt} - alunecarea optimă
- τ_{opt} din $2 \tau \cdot f = \frac{v_N}{1-s_{opt}} \Rightarrow \tau_{opt} = \frac{v_N}{2 \cdot f(1-s_{opt})}$
- $d_{Al} = d_{opt}$ - grosimea optimă a plăcii de aluminiu
- "p" rezultă din relația (6.1).

Calculul se reia pentru mai multe frecvențe ($f = 20 \div 200 \text{ Hz}$) în fiecare caz obținându-se avînd în vedere condiția de optim a $\eta \cdot \cos \varphi$ mărimile mai sus enumerate.

S-au avut în vedere frecvențele

- $f_1 = 80 \text{ Hz}$
- $f_2 = 100 \text{ Hz}$
- $f_3 = 140 \text{ Hz}$
- $f_4 = 180 \text{ Hz}$

La fiecare valoare a frecvenței rezultă o valoare maximă pentru $\eta \cdot \cos \varphi$, în situația lui d_{Al} optimă pentru acea frecvență. Se pot reprezenta astfel valorile maxime ale produsului $\eta \cdot \cos \varphi$ la diferite frecvențe (fig.6.23). Frecvența corespunzătoare valorii de vîrf a produsului $\eta \cdot \cos \varphi$ în cazul studiat ($V_N = 80 \text{ m/s}$) este de $f = 148 \text{ Hz}$ și reprezintă frecvența optimă la această viteză.

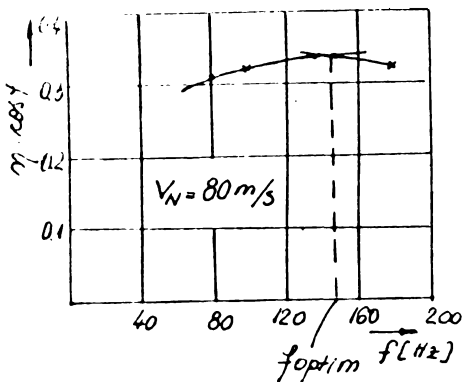


Fig.6.23. Determinarea frecvenței optime de alimentare la viteză nominală dată. ($V_N = 80 \text{ m/s}$).

Pentru această frecvență $f_{opt} = 148 \text{ Hz}$ se determină (cu metoda dată în fig. 6.20, 6.21, 6.22) următoarele mărimi:

$$s_{opt}; \zeta_{opt}; d_{Al\ opt}; p.$$

Grosimea optimă a plăcii de aluminiu se obține din fig.6.24, iar alunecarea optimă rezultă din fig.6.25.

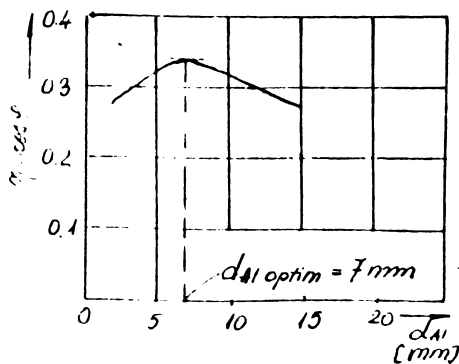


Fig. 6.24. Determinarea grosimii optime a aluminiului la $f = f_{opt} = 148 \text{ Hz}$

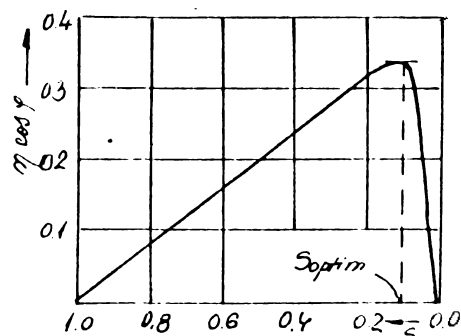


Fig.6.25. Determinarea alunecării optime la $f_{opt} = 148 \text{ Hz}$ și $d_{Al\ opt} = 7 \text{ mm}$

Se cunosc, în acest mod, frecvența optimă: $f_{opt} = 148$ Hz, grosimea optimă a plăcii de aluminiu: $d_{Aopt} = 7$ mm și alunecarea optimă: $s_{opt} = 0.137$, la viteza nominală $V_N = 80$ m/s.

Pasul polar al mașinii se determină din:

$$\zeta_{opt} = \frac{V_N}{2 \cdot f_{opt} (1 - s_{opt})} = 0.313 \text{ m} \quad (6.2)$$

Numărul de creștături pe pol și fază, la un pas de creștătură $\zeta_c = 3,48$ cm, folosind relația (3.3) este:

$$q = \frac{\zeta_{opt}}{3 \cdot \zeta_c} = 3 \text{ creștături/pol, fază} \quad (6.3)$$

iar numărul perechilor de poli:

$$2p + 1 = \frac{2,82}{0,313} = 9 \quad \Rightarrow \quad p = 4 \quad (6.4)$$

Suprafața creștăturii rezultă din:

$$q_{crest} = \frac{2 NI_1}{j_{cu} \cdot K_u} \quad (6.5)$$

unde $NI_1 \sqrt{2}$ este dat de relația (3.4) și celelalte mărimi sînt cunoscute.

În acest mod toate dimensiunile geometrice ale mașinii sînt stabilite și de asemenea condițiile de alimentare.

Calculul de optimizare a luat în considerare criteriul $\underline{\eta \cdot \cos \varphi}$ maxim, la $V_N = 80$ m/s.

Pentru alte viteze de funcționare s-au obținut rezultatele din fig. 6.26.

Din fig. 6.26 se poate alege frecvența optimă de alimentare la viteza de mers dată (V_N) și pe baza metodei prezentate pentru $V_N = 80$ m/s se calculează mărimile principale ce caracterizează funcționarea mașinii.

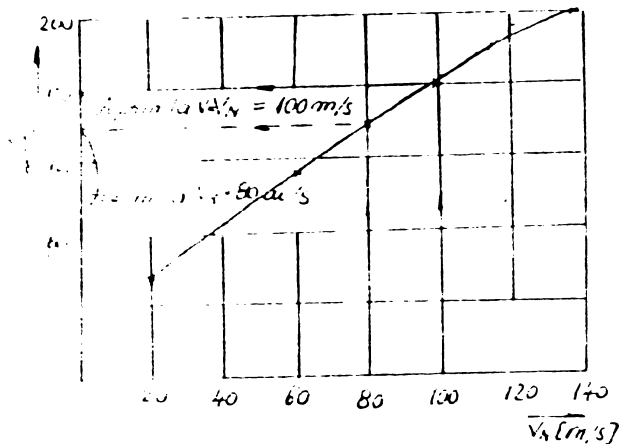


Fig.6.26. Frecvența optimă de alimentare în funcție de viteza indusului la $\eta \cos \varphi$ maxim.

VI.3.2. Criteriul de optimizare B ($p_m = P_{mec}/M_{ind}$ - maxim).

În cazul aplicațiilor unde greutatea M.L. are o mare importanță (în sistemele unde se folosește ca motor de accelerare), criteriul unui raport putere/greutate, maxim, se impune cu necesitate.

În asemenea aplicații nu se pune problema unei viteze nominale V_N și nici a unui produs $\eta \cdot \cos \varphi$ maxim, performanțele fiind determinate de valoarea raportului p_m .

Forța de accelerare se presupune cunoscută și astfel este definită lățimea și lungimea mașinii.

Una din modalitățile de creștere a lui p_m ar fi mărirea densității de curent în înfășurările inductorului ceea ce ridică probleme deosebite la răcire. Se va conta pe densități de curent cât mai mari posibile avînd în vedere situația concretă dată.

Problemele de optim, în sensul acestui criteriu, se pun la alegerea grosimii plăcii de aluminiu de-a lungul căii de rulare, respectiv determinarea frecvenței de alimentare ca o funcție de viteză.

Pentru simplificare se consideră o accelerație constantă (a) de-a lungul întregului traseu și astfel se cunoaște și dependența spațiu-viteză ($S = V^2/2a$).

Mărimile de determinat (d_{Al}, f), în baza acestui criteriu de optim, se vor putea exprima, astfel, în func-

ție de viteză momentană a motorului liniar.

Deoarece $P_{mec} = F \cdot V$, la o masă constantă, rezultă că p_m este maxim când forța dezvoltată de motor e maximă, la un anumit \underline{y} dat.

Viteza mașinii crește de la $V = 0$ la $V = V_{max}$ (la capătul liniei), astfel că frecvența de alimentare și grosimea plăcii de aluminiu se vor modifica în funcție de viteză, în așa fel ca la orice \underline{y} , punctul de funcționare pe caracteristica mecanică respectivă, să se afle în zona maximumului forței.

Intrefierul mașinii se presupune cunoscut fiind impus din considerente practice.

În fig.6.27 s-au reprezentat caracteristicile mecanice pentru mai multe grosimi ale plăcii de aluminiu, la o frecvență dată.

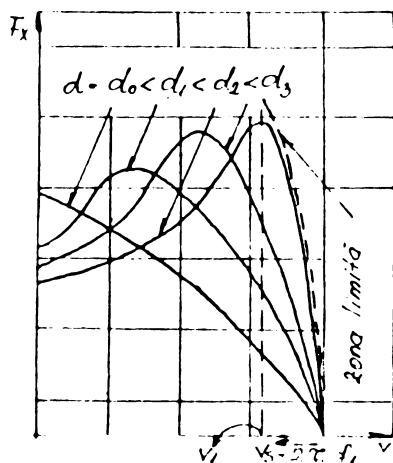


Fig.6.27. Determinarea grosimii plăcii de aluminiu din indus la viteza V_1 și frecvența de alimentare f_1 . ($d_{Al\ opt} = d_2$).

Mărirea grosimii plăcii de aluminiu la frecvența f_1 , nu poate însă deplasa caracteristicile mecanice peste zona marcată punctat în fig. 6.27 (zona limită).

La $f = f_1$ (fig.6.27), convine $d_{Al} = d_2$ și corespunde vitezei $V = V_1$.

În acest mod se va proceda și pentru alte frecvențe explorându-se plaja $40 + 160$ Hz.

Cu datele obținute s-a determinat dependența grosimii plăcii de aluminiu și a frecvenței de alimentare în funcție de viteza M.L.

Rezultatele se pot rezuma în figurile 6.28 și 6.29, unde se reprezintă $f_{opt} = f_1(V)$ și $d_{Al\ opt} = f_2(V)$. S-a avut în vedere o M.L.U. cu datele: $\sigma = 0.2\text{ m}$; $\delta = 10\text{ mm}$; $p = 4$; $r_c = 0.2\text{ m}$; $L = 0.34\text{ m}$ folosită pînă la viteza de 50 m/s .

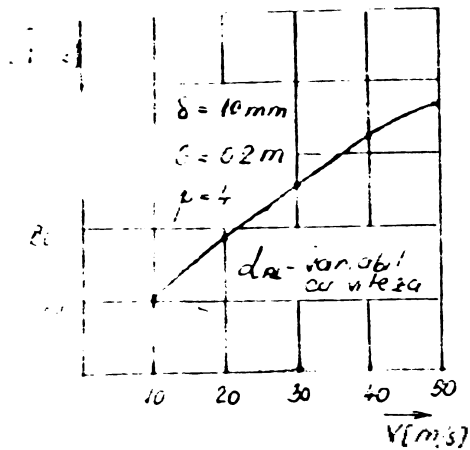


Fig. 6.28. Frecvența optimă de alimentare în funcție de viteză.

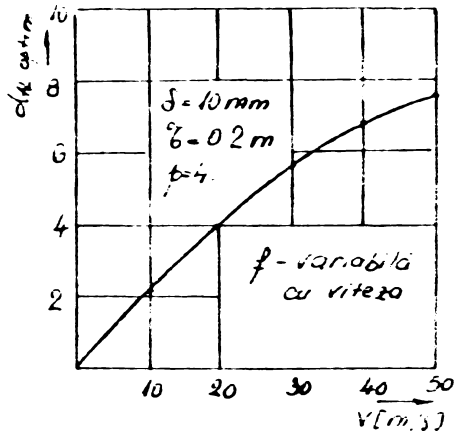


Fig. 6.29. Grosimea optimă a plăcii de aluminiu din indus în funcție de viteză.

Condițiile de alimentare și configurația indusului se obțin din fig. 6.28, 6.29 în funcție de viteza de mers. În concluzie cele două criterii de optimizare prezentate oferă posibilitatea unei dimensionări optime a M.L.U. Totuși, la alimentarea M.L. cu frecvență variabilă trebuie avut în considerare faptul că sistemul de alimentare se complică mult, prețul și greutatea fiind mult mai ridicate ca la frecvența industrială de 50 Hz (60 Hz).

Astfel, scăderea de greutate realizată pe partea motorului se completează cu mărirea greutății sistemului de alimentare.

Costul exploatării se mărește și câștigul pe partea întregii acționări se reduce.

În cazurile concrete ale aplicațiilor practice, situația trebuie privită în ansamblul ei, soluția tehnică aleasă trebuie să fie și soluția tehnico-economică cea mai favorabilă și deci calculul tehnic trebuie completat cu unul economic.

Cap. VII.

CONCLUZII

In lucrare, s-a analizat problema M.L.U. și a F.L. După o prezentare critică a problemelor tratate de literatura de specialitate, se prezintă fenomenele specifice M.L.U. și metodele de calcul propuse.

Principalele rezultate ale lucrării sînt:

- Problema pătrunderii cîmpului electromagnetic în medii feromagnetice și calcularea performanțelor M.L.U., se încadrează în studiul ecuațiilor lui Maxwell în medii neliniare și este tratată în mod mai riguros prin metoda straturilor.

- Fenomenul longitudinal și cel transversal este analizat prin descompunerea solenației primare după lungimea și lățimea mașinii în serii duble Fourier. Se indică metoda de calcul a lungimii L_L , dintre inductoare, pe baza factorului de calitate al mașinii, a cărui expresie este dată pentru cazul concret al M.L.U.

- Pe baza soluțiilor ecuațiilor satisfăcute de potențialul magnetic vector se determină componentele inducției electromagnetice, ale densității de curent din induș, precum și valorile forțelor longitudinale, normale și transversale. Se determină puterea electromagnetică în întrefierul mașinii și cu ajutorul expresiilor stabilite se calculează randamentul și factorul de putere al mașinii. Tensiunea la borne, variația permeabilităților magnetice ale straturilor, funcționarea M.L.U. în zona alunecărilor mici se analizează în continuare folosind un program de calcul conceput în acest scop.

- Incercările experimentale făcute au avut drept scop verificarea ipotezelor de calcul precum și a rezultatelor teoretice obținute. Modelul experimental a permis ridicarea caracteristicii mecanice pentru cazul M.L.U.

- Se analizează în continuare problema calculului optimal al M.L.U. alimentate la frecvență variabilă. Pe baza relațiilor stabilite se dimensionează optimal o M.L.U. de mare viteză folosită la propulsia vehiculelor rapide.

- Folosind metoda straturilor se prezintă teoria F.L. cu excitația în c.c. și indușul șina de cale ferată. Verifico-

rea experimentală a teoriei propuse s-a făcut pe un model de laborator și de asemenea folosind rezultatele încercărilor efectuate pe căile ferate franceze (S.N.C.F.).

- Se face și la F.L. un calcul optimal și se determină dimensiunile geometrice pentru un model propus la frînarea trenurilor de mare viteză.

- În continuare se analizează trei metode simplificate de calcul a M.L.U. Prima metodă consideră ciclul de iztereză al materialului indusului pe cale analitică și numerică. A doua metodă oferă un calcul grafo-analitic al performanțelor M.L.U. pe baza unor diagrame general valabile. Metoda a treia oferă relații de calcul simplificate, care deși introduc anumite erori, ele dobândesc o importantă valoare practică prin simplitatea lor.

Teoriile de calcul prezentate, confirmate experimental, oferă o cunoaștere generală și precisă a M.L. asincron în general și a celui unilateral în special.

B I B L I O G R A F I E

- A.1. Andrei, R. - Contribuții la teoria și proiectarea motoarelor asincrone liniare plane de mare viteză cu indus neferomagnetic - Teză de doctorat Institutul Politehnic București, 1973.
- A.2. - L'aerotrain et l'aménagement des Grandes Metropoles - Conférence, 28 avril 1969 - Marsilia.
- A.3. Andrei, R. - Forțe normale și tangențiale la motorul liniar asincron de mare viteză - Electrotehnica, Nr.2 (Februarie), 1972, p 180-189.
- A.4. Armstrong, D.S. - Application of the linear motor to transport - Rly.Gaz.Feb.1967, Tom 123, p 145-150.
- A.5. Antruffe, N. - Le moteur lineaire - Rev.Gen.de Chemin de Fer, Nr.4 (avril), 1968, p 180-186.
- A.6. Ancel, T.
Foure, A. - Structural variations of the linear motor for different application - R.G.E., vol.80, 1971, No.2, p 135-137.
- A.7. Andrei, R.
Sorani, I. - Studiul unor configurații de motor asincron liniar folosite în tracțiunea electrică - Studii și cercetări de energetică, Nr.4, Tom 23, 1973, p. 321-328.
- A.8. Appun, P. - Ein electromagnetisches Trag- und Führungssystem für schienengebundene Hochgeschwindigkeitsfahrzeuge - Elektrische Bahnen, Tom 46 (1975), H 4, p 86-88.
- B.1. Babescu, M.
Andea P. - Asupra motorului electric liniar asincron unilateral cu indus feromagnetic - Electrotehnica 1976 (24) august, p 191-194,

- B.2. Babescu, M. - Calcularea forței de propulsie la un motor liniar cu indus feromagnetic, considerând efectul transversal și cel de saturație - Ses. științifică I.P.T. Secția Magini și Utilaje electrice, Timișoara, iunie 1974.
- B.3. Babescu, M. - Împingător pentru vagoneti acționat de motor liniar asincron - Raport întocmit pentru C.M.N.Deva, Contract de cercetare științifică, Timișoara 1972-1973.
- B.4. Babescu, M.
(colectiv motoare liniare) - Cercetări teoretice și experimentale privind aplicabilitatea maginilor liniare în unele sisteme de transport - Documentație întocmită pentru MICM, pe bază de contract, Timișoara 1972-1976.
- B.5. Babescu, M.
Bogoevici, Gh. - Asupra calculului și experimentării motoarelor liniare de viteze mici și medii, cu aplicabilitate la unele sisteme de transport - Ses. II de comunicări științifice a tinerilor ing. din Timișoara, I.P.T., 24 februarie 1974.
- B.6. Babescu, M. - Determinarea repartiției cimpului electromagnetic, a parametrilor indusului și calcularea forței de propulsie la un motor liniar unilateral - Lucrările I.C.P.E.-București - 1975, Nr.30, p 21-30.
- B.7. Babescu, M.
Mosebach, H. - Asupra calculului generatoarelor M.H.D. asincrone - Sesiunea IV de comunicări teh.-științifice, I.C.P.E.T. iulie, 1975.
- B.8. Babescu, M. - Caracteristicile motorului electric liniar asincron unilateral - Sesiunea IV de comunicări teh.-științifice, I.C.P.E.T., iulie 1975.

- B.9. Babescu, M. - Le transport urbain et interurbain, utilisant les moteurs électrique linéaire - Seminar CEE - ONU - Bucureşti, septembrie 1974.
- B.10. Babescu, M. - Determinarea variației cimpului magnetic în zonele de capăt, la motoarele liniare bilaterale - Bul. şt. şi tehnic al I.P. Timișoara, seria Electrotehnică, fasc.2, 1974, Tom 19(33), p 227-232.
- B.11. Boldea, I.
Babescu, M.
Biriescu, M. - Asupra efectului de refulare și transversal la motoarele liniare unilaterale cu indus feromagnetic - Bul. şt. şi tehnic al I.P. Timișoara, seria Electrotehnică, fasc.1, 1973, Tom 18(32), p 60-70.
- B.12. Boldea, I.
Babescu, M. - Studiul la alunecări mari a motoarelor liniare unilaterale cu indus din aluminiu pe fier masiv - Bul. şt. şi tehnic al I.P. Timișoara, seria Electrotehnică, fasc.2, 1975, Tom 20(34).
- B.13. Boldea, I.
Babescu, M. - A multilayer theory of d.c. linear brakes with solid-iron secondary - Proc. I.E.E. - 1976, No.8, august, p 860-869.
- B.14. Boldea, I.
Babescu, M. - A multilayer approach to the analysis of single sided induction motors - Proc. I.E.E. - 1976 (sub tipar).
- B.15. Boldea, I. - Contribuții privind fenomenele specifice și calculul electromagnetic al motoarelor asincrone plane liniare - Teză de doctorat. I.P.T. "Traian Vuia" Timișoara, 1972.
- B.16. Boldea, I. - Calculul repartiției cimpului electromagnetic și al caracteristicilor motoarelor liniare unilaterale cu indus din aluminiu-fier - Electrotehnica, Nr.11, Tom 21, 1973, p 430-434.

- B.17. Boldea, I.
Nasar, S.A. - Quasiunidimensional theory of linear induction motors with half-filled primary endslots - Proc.I.E.E., vol 122, 1975, No 1, p 61-66.
- B.18. Boldea, I.
Nasar, S.A. - Some baseline specifications for an optimal design of a high-speed linear induction motor - International Symposium on Linear Electrical Motors, 15-17 May, Lyon-Grenoble, 1974.
- B.19. Boldea, I. - Asupra performanțelor motoarelor electrice liniare destinate propulsiei vehiculelor rapide, (300-500 km/h) - Electrotehnica. E.A., vol 23, nr.3, 1975, p 103-113.
- B.20. Boldea, I. - Thrust and normal forces in a segmented secondary linear reluctance motor - Proc.I.E.E., vol 122, No 9, septembrie 1975, p 922-924.
- B.21. Boldea, I.
Nasar, S.A. - The optimum goodness criterion for linear induction motor design - manuscris.
- B.22. Boldea, I.
Nasar, S.A. - Simulation of high-speed linear-induction motor end effects in low-speed tests - Proc. I.E.E., vol. 121(1974), No 9, p 961-964.
- B.23. Bolton, H. - Forces in induction motors with laterally asymmetric sheet secondaries - Proc. I.E.E., vol 117 (1970), nr 12, p 2241-2248.
- B.24. Bolton, H. - Transverse edge effect in sheet-rotor induction motor - Proc. I.E.E., vol 116, 1969, nr.5, p 725-731.
- B.25. Boon-Tack Ooi. .
White D.C. - Traction, and normal forces in the linear induction motor - I.E.E. Trans. Bd.89(1970), p 638-645.
- B.26. Bopp, K. - Problemes des spurgebundenen Landverkehrs der Zukunft mit höchsten Geschwindigkeiten aus der Sicht des Elektrotechnikers - Elektrische Bahnen, Tom 45(1974) H 10, p 222-229.

- B.27. Bromanti, A.
Dalmazzo, R.
Tellini, A. - Etude experimentale sur le moteur tubulaire - Symposium International sur les Moteurs Electriques Lineaires., 15 mai 1974 - Lyon.
- B.28. Barwell, F.T.
Laithwaite, E.R. - Application of the Linear Induction motor to high speed transport - Proc.I. Mech.Engg., vol 56, 1967, p 1900-1910.
- B.29. Beatson, C. - Linear motors are poised to thrust into industry - Engineer, vol 230, 1970, No 5968, p 38-39.
- B.30. Bonnefille, R.
Kont, M. - Contribution a l'etude de la machine lineaire a induction - R.G.E. vol 79, 1970, No 10, Nov. p 846-852.
- B.31. Bolidek, A.U. - Magnitnie pole inductorov lineinfi electromagnitni rasov - Elektromehanika Nr. 12/1958, p 14-20.
- B.32. Brunelli, B. - Studio del motore al induzione com statore del arca - L'Energia Electrica, Nr.10, 1965, p 634-637.
- B.33. Bobineau, D.
Teyssandier, C. - Une station d'essai de moteurs lineaires a grande vitesse - R.G.R., Tom 84, No 2, Fevrier, 1975, p 137-140.
- B.34. Budig, P.K. - Theoretische Ergebnisse der gemeinsamen Forschungsarbeit URSS-DDR zur Bemessung von Drehstromlinearmotoren für kleine synchrone Geschwindigkeiten. Elektrik 29(1975), H 5, p 245-251.
- B.35. Boldea, I.
Babescu, M. - Baseline specifications for the optimal design of linear eddy current rail brakes - Bul.I.P.T. (in curs de aparitie).
- B.36. Babescu, M.
Boldea, I.
Maioan, V. - Karakteristike linearnog indukcionog jednostranog motora - Elektrotehnika, Nr.7 - 8, 1976, p 11-15.

- C.1. Cossie, A. - Moteurs électriques de traction pour puissances et vitesses élevées - R.G.E., Tom 84, No-2, Février, 1975. p 107-111.
- C.2. Hatelain, J.M. - Quelques problèmes posés par l'application des moteurs électriques rotatifs aux transports à grande vitesse - R.G.E., Tom 84, No-2, Février, 1975 p 102-106.
- C.3. Chi, C.C. - L.I.M. Guidance Systems Dynamics. Theoretical Studies and Experimental Tests - Report FTA-ORD and D-74-27, Department of Transportation, Sept. 1973.
- C.4. Cynober, S. - Applications of the linear motor to the handling of materials - R.G.E., Tom 80, No-2, Février, 1971, p 114-120.
- C.5. Cantemir, L. - Contribuții teoretice și experimentale asupra motorului trifazat liniar de inducție și posibilități de utilizare - Teză de doctorat, Institutul Politehnic Iași, 1974.
- C.6. Constantin, Gh. - Motor liniar monofazat cu poli ecranate Teză de doctorat, Institutul Politehnic Timișoara, 1974.
- C.7. Constantin, Gh.
Constantin, E. - Considerații asupra unui nou tip de motor liniar monofazat - Electrotehnica, vol 22, 1974, Nr.1, p 8-14.
- D.1. Dordea, T. - Mașini electrice - E.D.P. București, 1970.
- D.2. Dimboiu, E. - Contribuții la studiul motorului liniar cu cîmp mobil - Teză de doctorat, I.P. Brașov, 1970.

- D.3. Dupont, R. - Captage du courant à très grande vitesse par système pantographe-caténaire - R.G.E., Tom 84, No-2, Février 1975, p 125-130.
- D.4. Dancea, I. - Programarea calculatoarelor numerice pentru rezolvarea problemelor cu caracter tehnic și de cercetare științifică - Ed. Dacia Cluj, 1973.
- D.5. Dancea, I. - Metode de optimizare - Ed. Dacia Cluj 1976.
- E.1. Eastham, J.E.
Baichin, M.J. - Pole change windings for linear induction motors - Proc. I.E.E., vol 122, No-2, February, 1975, p 154-158.
- E.2. Eastham, J.F.
Lithwaite, E.R. - Linear motor topology - Proc. I.E.E., vol 120, No-3, march 1973, p 337-343.
- F.1. Freeman, E.M.
Lowther, D.A. - Normal force in single-sided linear induction motors + Proc. I.E.E., vol 120, 1973 p 1499-1506.
- F.2. Fleury, B.
Poloujadoff, M.
Robert, J. - Contribution à l'étude de l'effet d'extrémité dans les machines linéaires à induction et au calcul du freinage par aimant - Communication de la Société française des Electriciens, 17 avril, 1970.
- F.3. Foggia, A.
Sabonnadière, J.C. - Finite element solution of saturated travelling magnetic field problems - C.R. Acad. Sc. Paris, serie B, t 276, 2 avril 1974.
- G.1. Gutt, H.J. - Gesichtspunkte im Hinblick auf den Einsatz moderner Linear- bzw. Wanderfeldmotoren - V.D.I., Z 115, 1973, Nr. 16. November, p 1259-1265.
- G.2. Guimbal, J. - Le moteur axial et ses applications - R.G.E., Tom 84, No-2, Février 1975, p 121-123.

- G.3. Goldschmidt, R. - Courants faibles - Tom 2, Lausanne, E.P.F.L., 1972.
- H.1. Hadlow, M.E. - Superconductivity and its applications to power engineering - Proc. I.E.E.; vol. 119, 1972, No8, p 1003-1010.
- H.2. Holley, H.
Nasar, S.A.
L. del Cid - Computations of fields and forces in a two-sided linear induction motor - I.E.E. Trans, vol PAS-92, 1973, No 4, p 1310-1315.
- H.3. Hübner, K.D.
Mosebach, H.
Weh, H. - Ein Beitrag zur Berechnung des Luftspaltfeldes von asynchronen Linear- motoren - E.T.Z.-A, Bd 93, 1972, H 11, p 644-646.
- H.4. Hochhäusler, P. - Neue Erkenntnisse für den Betrieb der magnetischen Schwbebahn - E.T.Z., B 25, 1973, H 3, p 45-48.
- I.1. Ivanov, M.
Baudon, Y. - Methode de partition pour le calcul des courants induits dans les sustentations par attraction - Symposium International sur les Moteurs Electriques Lineaires, 15 mai 1974, Lyon.
- I.2. Ivanov, M. - Moteurs lineaires et sustentation - Symposium International sur les Moteurs Electriques Lineaires, 15 mai 1974, Lyon.
- I.3. Ivanov, M.
Subonnadiere, J.C. - Etude numerique des effets d'extremite Symposium International sur les Moteurs Electriques Lineaires, 15 mai 1974, Lyon.
- J.1. Jufer, M. - Détermination des caracteristiques spécifiques du moteurs linéaire - R.G.E. vol 80, 1971, No 2, p 105-113.

- J.2. Jufer, M. - Moteur lineaire a induction, influence des dissymetries transversales et laterales de l'induit - Symposium International sur les Moteurs Electriques Lineaires, 15 mai 1974, Lyon.
- J.3. Jones, P.L. - Linear motors for elevator door operators - Elevators word, May 1970, p 34-36.
- J.4. Johnson, W. .
Laithwaite, E.R.
Slater, R.A.C. - Experimental impact extrusion machine driven by a linear induction motor - Proc.I.Mech.Eng., vol 179, 1965, No 1, p 15-35.
- J.5. Jordan, H.
Teichgraber, U. - Berechnung der Wickelhopfkräfte von Linear-
motoren mit Grammescher Ringwicklung - Bull.A.S.E., Tom ⁶²1974, 3-9, Fevrier, p 158-161.
- J.6. Jufer, M.
Mattatia, S. - Le moteur lineaire a un inducteur caracteristiques et aplications - Bull A.S.E. Tom 65, 1974, No 12-15, p 880-891.
- J.7. Jufer, M. - Moteurs lineaires - Phenomenes d'attraction et de repulsion - Bul. Tech. de la Suisse Romande, No 21, (13 octobre), 23 (10 novembre), 1973, pl-6.
- J.8. Jufer, M.
Mattatia, S.
Wavre, N. - Moteur lineaire a induction, Possibilites de reglage de la vitesse - Bul. Tech, de la Suisse Romande, No-21, (13 octobre), 23 (novembre), 1973, p 12-16.
- K.1. Kant, M.
Moulliet, A.
Schheuer m. - Etude theoretique et experimentale des enroulements des moteurs lineaire a induction - R.G.E., Tom 80, 1970, Nr.1. p 13-19.
- K.2. Kreuth, H.P. - Die Zahnimpedanzen axial genuteter asynchroner Massivlufermaschinen - Archiv f. Elektr. Tom 55, 1973, p 341-345.
- K.3. Kant, M. - Etude numerique et experimentale d'un moteur lineaire d'un moteur lineaire a induction - Symposium International sur les Moteurs Electriques Lineaires, 15 mai 1974, Lyon.

- L.4. Kliman, G.B.
Elliot, D.G. - Linear Induction motor experiments in comparison with mesh/matrix analysis - I.E.E. Trans. Paper T - 73-129-4.
- L.5. Flocke, W. - Anwendung von Linearmotoren in der Schiffbau Versuchsanstalt - Elektr. 24, 1970, p 354-356.
- L.6. Laithwaite, E.R. - Induction machines for special purposes - George Newnes Limited. London 1966.
- L.7. Laithwaite, E.R.
Brewell, P.T. - Application of linear induction motors to high-speed transport system - Proc. I.E.E., vol 116, 1969, p 713-724.
- L.8. Laithwaite, E.R. - Le développement du moteur linéaire - Machine Outil, Tome 288, 1972, p 87-90.
- L.9. Laithwaite, E.R.
Bolton, H.R.
Eastham, J.F. - High speed linear motor testing at imperial college - manuscrit.
- L.10. Laithwaite, E.R.
Eastham, J.F.
Bolton, H.R. - Linear motors with transverse flux. Proc. I.E.E., vol 118, 1971, Nr 12, p 1761-1767.
- L.11. Laporte, B. - Étude du comportement d'un matériau ferromagnétique isotrope dans un champ glissant - R.G.E., Tom 83, N 3, Mars, 1974, p 155-160.
- L.12. Linke, H. - Betriebsverhalten und steuerung eines speziellen Linearmotors - Industrieanzeiger, Bd. 92, 1970, N 25, p 533-535.
- L.13. Laporte, B. - Contribution a l'optimisation des convertisseurs électromécaniques asynchrones linéaires - Symposium International sur les Moteurs Electriques Linéaires, 15 mai, 1974, Lyon.

- L.9. Lenzkes, D. - Elektrische Antriebe mit Linearmotoren - prospect Siemens.
- L.10. Leitgeb, W. - Aktuelle Fragen im Elektromaschinenbau - ETZ-A, Tom 81, 1970, p 717-718.
- L.11. Laurent, D. - Contribution à l'étude des systèmes de captage de courant à grande vitesse R.G.E., Tom No 2, Fevrier 1975, p 131-135.
- L.12. Lichtenberg, A. - Forschungs und Entwicklungsstand der elektrodynamischen schwebetechnik in der R.F.G. - Elektrische Bahnen, Tom 46 (1975) H 3, p 69-71.
- M.1. Machefert, Y. - Application du moteur lineaire dans les transports - R.G.E., Tom 80, 1971, N 2, p 121-130.
- M.2. May, H.
Mosebach, H.
Weh, H. - Rechnerische Behandlung, Betriebsverhalten und Ersatzschaltbild des asynchronen Scheiben motors - ETZ-A, Bd 94, 1973, H 10, p 574-577.
- M.3. Mosebach, H. - Effekte des endlichen Länge und Breite bei asynchronen Linearmotoren im Kurzständer und Kurzluferbauform - Diss. T.U. Braunschweig 1972.
- M.4. Macchiarole, B. - Linear Induction Motors - L'Energia Electrica, vol. 42, N 1, 1965, p 343-346.
- M.5. Matsumiya, T.
Takagi, K. - End-Effect and equivalent circuit of Linear induction machines - Electrical Engineering in Japan, vol 91, 1971, No 1, p 117-127.
- M.6. Mattatia, S. - Application des moteurs lineaires a induction a la manutention, etude comparative des structures possibles - Symposium International sur les Moteurs Electriques Lineaires, 15 mai 1974, Lyon.

- N.1. Nasar, S.A. - Certain approaches to the analysis of single sided linear induction motors - Proc.I.E.E., vol 120, 1973, No 4, p 477-483.
- N.2. Nasar, S.A. Del Cid - Propulsion and levitation forces in a single sided linear induction motors for high speed ground transportation - Proc.I.E.E., Tom 61, 1973, p 638-644.
- N.3. Nasar, S.A. - Electromagnetic fields and forces in linear induction motor, taking into account edge effect - Proc.I.E.E., vol 116, 1969, Nr.4, p 605-609.
- N.4. Nicolescu, E. - Incălzirea ginei de reacție a motorului asincron liniar de tracțiune - Electro-tehnica, Tom 22, 1974, p 162-165.
- N.5. Neiman, I. - Povershnostatni effect V ferromagnitni telah - Moscova, Leningrad, Gosenegeledat 1949.
- H.6. Nasar, S.A. Baldea, I. - Linear motion electric machines - John Wiley, New York, 1976.
- O.1. Oberretl, K. - Dreidimensionale Berechnung des Linear-motors mit Berücksichtigung der Endeffekte und der Wicklungsverteilung - Arch.f. Elektrotechn. Bd 55, 1973, p 181-190.
- O.2. Oberretl, K. - Linearmotor mit gedehnter oder kompakter Zweischichtwicklung - Arch.f. Elektrotechn. Bd 56, 1974, p 55-58.
- O.3. Oberretl, K. - Linear motors with special double-layer windings - Conf. on Linear Electric Machines, London, Oct. 1974, IEE-Publ. No 120.
- O.4. Oberretl, K. - Einseitiger Linearmotor mit Käfig im Sekundärteil - Arch. Electrotechn. Bd 56, 1974, p 305-319.

- O.5. Oberretl, K. - Die Oberfeldtheorie des Kffizmotora unter Berücksichtigung der durch die Ankerrückwirkung verursachten Statoroberströme und der parallelen Wicklungszweige - Arch.f. Elektrot. Bd. 49, 1965, p 343-364.
- O.6. Oberretl, K. - Vergleich von Rechnung und Messung beim amerikanischen Schnellbahn-Linearmotor von Pueblo - ETZ-A, Bd 96, 1975, H 11, p 533-536.
- P.1. Polonyadoff, M. - Les hypotheses de calcul des moteurs
Sabonnadiere, J, C. lineaires a induction - R.G.E., vol 80, 1971, N 1, p 29-35.
- P.2. Polonyadoff, M. - Perfectionnement à la théorie des moteurs d'induction linéaires destinés à la traction - C.R.Acad., Paris, aout 1966 p 605-607.
- P.3. Pelenc, Y. - Nouvelle méthode de propulsion électrique - Merlin Gerin, 1970, Société - Moteur Linéaire-Grenoble.
- P.4. Preston, T.W. - Transverse edge effects in linear induction motors - Proc.I.E.E., vol 116, 1969, p 974-989.
Recco, A.B.
- P.5. Polonyadoff, M. - Influence de la forme du circuit magnétique sur les effets de bord dans les moteurs linéaires à induction et sur le freinage par un aimant - C.R. Acad.Sc., Paris, Tom 269, 1969, serie B, p 1215-1218.
- P.6. Polonyadoff, M. - Étude théorique et expérimentale de
Reyx, Ph. l'influence des sections de retour sur le fonctionnement des moteurs d'induction linéaires à inducteur court - C.R.Acad. Sc.Paris, Tom 263, 1966, serie B, p 799-802.

- P.7. Peșteanu, O. - Schemele echivalente ale motoarelor asincrone liniare și ale pompelor M.H.D. plane - Electrotehnica E.A., 23, nr.7, oct., 1975, p 317-324.
- P.8. Póstnikov, J.M. - Metod analiza electricescix masin s
Sceastlivii, G.G. ispolzovaniem udelinfx parametrov -
Elektricesstvo, N 1, 1969, p 12-19.
- P.9. Pouillet, P. - Experimentarea de către S.N.C.F. a unei frâne electromagnetice cu curenți Foucault - R.G. des Chemins de Fer, Nr. 3, 1974, vol 79, p 203 - 210.
- H.1. Rummich, E. - Etat de développement et possibilités d'application de moteurs linéaires - Bull.A.S.E., Tom 63, 1972, Sept, p 1093-1098.
- H.2. Rummich, E. - Gleichstromlinearmaschinen, Theorie und Anwendung - E und M, Heft 7, 1974, p 386-391.
- H.3. Rummich, E. - Der Sektormotor und seine theoretische Behandlung - Bull A.S.E., Tom 63, 1972, p 1485- 1490.
- R.4. Rose, J.A. - ROMAG transportation System - I.B.I.D. vol 61, may 1973, p 617-620.
- S.1. Sabonnadiere, J.C. - Contribution à l'étude des moteurs asynchrones linéaires - Diss. Université Grenoble, 1969.
- S.2. Smolenski, J. - Kriteriálnaia otenka electromagnitnfi
Abramkin, B. iavlenii v tonkoi feromagnetnoi plastinie rahodiaseisia v odnorodnom magnitnom peremennom pole - Elektricesstvo, Tom 6, 1974, p 59-61.
- S.3. Siemens Aktiengesellschaft - Waggonfabrik Verdingenag;
The H-Bahn-a Overhead Cabin Transport System for City Centres.

- S.4. StBlzel,D. - Einsatz von LinearMotoren im Bergbau -
Elektrie, 24,1970, H 10, p 361-365.
- T.1. Timmel,H. - Der Wanderfeld LinearMotor eine bemerkenswerte Sonder form des Induktionsmotors - Elektrie, Tom 80,1968, H 10, p 398-400.
- T.2. Timmel,H. - Beitrag zur vorausbestimmung des Stationären Betriebsverhaltens von kurzständer der LinearMotoren - Elektrie, Tom 24,1970, p 341-343.
- T.3. Teichgrüber,U. - Der einseitige LinearMotor mit massivem Eisenrückchluss- ETZ,A, Heft 11, p 528-532.
- V.1. Victorri,M. - Lineare InduktionsMotoren - ETZ,B,Tom 21, 1969, H 23, p 535-539.
- V.2. Voldek,A.J. - O teorii asinhronnoi magini s massivim feromagnitnim rotorom - Elektricitvo, Tom 1, 1974, p 75-78.
- V.3. Voldek,A.I. - Fundamentals and Methods for Calculating
Tolvinskaya,E.V. the Characteristics of L.I.M. - (in russian), Elektricitvo, N 9,1975, p 29-36.
- W.1. Wolley,M. - General theory of solid rotor induction machines - Proc. I.E.E., vol 119,1972, N 9, p 1301-1308.
- W.2. Weh,H. - Asynchrone LinearMotoren für Traktionsaufgaben - Energie u. Technik, 23. H 12, 1971, p 431-433.
- W.3. Weh,H. - LinearMotor mit Ringwicklung und Streufeldämpfung - ETZ,A,Bd 94,1973,H2, p 97-103.
Lany,A.
- W.4. Weh,H. - Kraftwirkungen orthogonal zur Bewegungsrichtung beim asynchronen LinearMotor -
Grumbkow,P. Monebach,H. ETZ,A, Bd 93,1972, H 1, p 1-7.

- W.5. Wiart, A. - Separation des variables dans l'étude des courants de moteurs linéaires au rotatifs à courants de Foucault - R.G.E. Nr 1, 1972, p 9-13.
- W.6. Wiart, A.
Machefer, Y. - Freins linéaires à courants de Foucault sur rail - R.G.E., Tome 82, N 5, 1973, p 356-358.
- W.7. Wuvre, N. - Etude encoche par encoche du bobinage et des caractéristiques des moteurs linéaires asynchrones - Symposium International sur les Moteurs Electriques Lineaires, 15 mai 1974, Lyon.
- W.8. Wuvre, N. - Moteurs linéaire à induction, effects d'extrémités conséquences et améliorations - Bul.Tech. de la Suisse Romande, N 21, 13 oct, 23, 10 nov, 1973, p 6-11.
- W.9. Wiart, A. - Groupe propulsur à moteur linéaire et convertisseur électronique - R.G.E., Tom 84, N 2, Février 1975, p 112-115.
- W.10. Weh, H.
Brases, H.
Mosebach, H. - Die Rechnerische Behandlung Asynchroner Linearen Wandler - Energy Conversion, vol 11, 1972, p 25-37.
- Y.1. Yee, H.
Wilson, T. - Saturation and finite-length effects in solid-rotor induction machines - Proc. I.E.E., vol 119, 1972, No 7, p 877-882.
- Y.2. Yee, H. - Effects of finite length in solid rotor induction machines - Proc.I.E.E., vol 118, 1971, No 8, p 1025-1033.
- Y.3. Yamamura, S. - Theory of linear induction motors - Wiley, 1972.
- Y.4. Yamamura, S.
Ito, H.
Ishikawa, Y. - Theories of linear induction motor and compensated linear induction motor - I.E.E. Trans., vol 91, 1972, p 1700-1710.
- Y.5. Yamamura, S.
Ito, H.
Ishikawa, Y. - Influence of End Effect on Characteristics of Linear Induction Motors - Electrical Engineering in Japan, vol 91, 1971, N 1, p 136-140.

VEHICUL EXPERIMENTAL -M.L.-E.M.T. -166-
 CALCUL PERFORMANTELOR PRIN METODA STRATURILOR
 FOLOSIREA SERIILOR DUBLE FOURIER

ANEXA
1

BLOCK DATA
 COMMON /E/ H(400)
 DATA H/42.,84.,126.,168.,210.,252.,294.,336.,378.,420.,462.,504.,546.,588.,630.,672.,714.,756.,798.,840.,882.,924.,966.,1008.,1050.,1092.,1134.,1176.,1218.,1260.,1302.,1344.,1386.,1428.,1470.,1512.,1554.,1596.,1638.,1680.,1722.,1764.,1806.,1848.,1890.,1932.,1974.,2016.,2058.,2100.,2142.,2184.,2226.,2268.,2310.,2352.,2394.,2436.,2478.,2520.,2562.,2604.,2646.,2688.,2730.,2772.,2814.,2856.,2898.,2940.,2982.,3024.,3066.,3108.,3150.,3192.,3234.,3276.,3318.,3360.,3402.,3444.,3486.,3528.,3570.,3612.,3654.,3696.,3738.,3780.,3822.,3864.,3906.,3948.,3990.,4032.,4074.,4116.,4158.,4200.,4242.,4284.,4326.,4368.,4410.,4452.,4494.,4536.,4578.,4620.,4662.,4704.,4746.,4788.,4830.,4872.,4914.,4956.,4998.,5040.,5082.,5124.,5166.,5208.,5250.,5292.,5334.,5376.,5418.,5460.,5502.,5544.,5586.,5628.,5670.,5712.,5754.,5796.,5838.,5880.,5922.,5964.,6006.,6048.,6090.,6132.,6174.,6216.,6258.,6300.,6342.,6384.,6426.,6468.,6510.,6552.,6594.,6636.,6678.,6720.,6762.,6804.,6846.,6888.,6930.,6972.,7014.,7056.,7098.,7140.,7182.,7224.,7266.,7308.,7350.,7392.,7434.,7476.,7518.,7560.,7602.,7644.,7686.,7728.,7770.,7812.,7854.,7896.,7938.,7980.,8022.,8064.,8106.,8148.,8190.,8232.,8274.,8316.,8358.,8400.,8442.,8484.,8526.,8568.,8610.,8652.,8694.,8736.,8778.,8820.,8862.,8904.,8946.,8988.,9030.,9072.,9114.,9156.,9198.,9240.,9282.,9324.,9366.,9408.,9450.,9492.,9534.,9576.,9618.,9660.,9702.,9744.,9786.,9828.,9870.,9912.,9954.,9996.,10038.,10080.,10122.,10164.,10206.,10248.,10290.,10332.,10374.,10416.,10458.,10500.,10542.,10584.,10626.,10668.,10710.,10752.,10794.,10836.,10878.,10920.,10962.,11004.,11046.,11088.,11130.,11172.,11214.,11256.,11298.,11340.,11382.,11424.,11466.,11508.,11550.,11592.,11634.,11676.,11718.,11760.,11802.,11844.,11886.,11928.,11970.,12012.,12054.,12096.,12138.,12180.,12222.,12264.,12306.,12348.,12390.,12432.,12474.,12516.,12558.,12600.,12642.,12684.,12726.,12768.,12810.,12852.,12894.,12936.,12978.,13020.,13062.,13104.,13146.,13188.,13230.,13272.,13314.,13356.,13398.,13440.,13482.,13524.,13566.,13608.,13650.,13692.,13734.,13776.,13818.,13860.,13902.,13944.,13986.,14028.,14070.,14112.,14154.,14196.,14238.,14280.,14322.,14364.,14406.,14448.,14490.,14532.,14574.,14616.,14658.,14700.,14742.,14784.,14826.,14868.,14910.,14952.,14994.,15036.,15078.,15120.,15162.,15204.,15246.,15288.,15330.,15372.,15414.,15456.,15498.,15540.,15582.,15624.,15666.,15708.,15750.,15792.,15834.,15876.,15918.,15960.,16002.,16044.,16086.,16128.,16170.,16212.,16254.,16296.,16338.,16380.,16422.,16464.,16506.,16548.,16590.,16632.,16674.,16716.,16758.,16800.,16842.,16884.,16926.,16968.,17010.,17052.,17094.,17136.,17178.,17220.,17262.,17304.,17346.,17388.,17430.,17472.,17514.,17556.,17598.,17640.,17682.,17724.,17766.,17808.,17850.,17892.,17934.,17976.,18018.,18060.,18102.,18144.,18186.,18228.,18270.,18312.,18354.,18396.,18438.,18480.,18522.,18564.,18606.,18648.,18690.,18732.,18774.,18816.,18858.,18900.,18942.,18984.,19026.,19068.,19110.,19152.,19194.,19236.,19278.,19320.,19362.,19404.,19446.,19488.,19530.,19572.,19614.,19656.,19698.,19740.,19782.,19824.,19866.,19908.,19950.,19992.,20034.,20076.,20118.,20160.,20202.,20244.,20286.,20328.,20370.,20412.,20454.,20496.,20538.,20580.,20622.,20664.,20706.,20748.,20790.,20832.,20874.,20916.,20958.,21000.,21042.,21084.,21126.,21168.,21210.,21252.,21294.,21336.,21378.,21420.,21462.,21504.,21546.,21588.,21630.,21672.,21714.,21756.,21798.,21840.,21882.,21924.,21966.,22008.,22050.,22092.,22134.,22176.,22218.,22260.,22302.,22344.,22386.,22428.,22470.,22512.,22554.,22596.,22638.,22680.,22722.,22764.,22806.,22848.,22890.,22932.,22974.,23016.,23058.,23100.,23142.,23184.,23226.,23268.,23310.,23352.,23394.,23436.,23478.,23520.,23562.,23604.,23646.,23688.,23730.,23772.,23814.,23856.,23898.,23940.,23982.,24024.,24066.,24108.,24150.,24192.,24234.,24276.,24318.,24360.,24402.,24444.,24486.,24528.,24570.,24612.,24654.,24696.,24738.,24780.,24822.,24864.,24906.,24948.,24990.,25032.,25074.,25116.,25158.,25200.,25242.,25284.,25326.,25368.,25410.,25452.,25494.,25536.,25578.,25620.,25662.,25704.,25746.,25788.,25830.,25872.,25914.,25956.,26000.,26042.,26084.,26126.,26168.,26210.,26252.,26294.,26336.,26378.,26420.,26462.,26504.,26546.,26588.,26630.,26672.,26714.,26756.,26798.,26840.,26882.,26924.,26966.,27008.,27050.,27092.,27134.,27176.,27218.,27260.,27302.,27344.,27386.,27428.,27470.,27512.,27554.,27596.,27638.,27680.,27722.,27764.,27806.,27848.,27890.,27932.,27974.,28016.,28058.,28100.,28142.,28184.,28226.,28268.,28310.,28352.,28394.,28436.,28478.,28520.,28562.,28604.,28646.,28688.,28730.,28772.,28814.,28856.,28898.,28940.,28982.,29024.,29066.,29108.,29150.,29192.,29234.,29276.,29318.,29360.,29402.,29444.,29486.,29528.,29570.,29612.,29654.,29696.,29738.,29780.,29822.,29864.,29906.,29948.,29990.,30032.,30074.,30116.,30158.,30200.,30242.,30284.,30326.,30368.,30410.,30452.,30494.,30536.,30578.,30620.,30662.,30704.,30746.,30788.,30830.,30872.,30914.,30956.,31000.,31042.,31084.,31126.,31168.,31210.,31252.,31294.,31336.,31378.,31420.,31462.,31504.,31546.,31588.,31630.,31672.,31714.,31756.,31798.,31840.,31882.,31924.,31966.,32008.,32050.,32092.,32134.,32176.,32218.,32260.,32302.,32344.,32386.,32428.,32470.,32512.,32554.,32596.,32638.,32680.,32722.,32764.,32806.,32848.,32890.,32932.,32974.,33016.,33058.,33100.,33142.,33184.,33226.,33268.,33310.,33352.,33394.,33436.,33478.,33520.,33562.,33604.,33646.,33688.,33730.,33772.,33814.,33856.,33898.,33940.,33982.,34024.,34066.,34108.,34150.,34192.,34234.,34276.,34318.,34360.,34402.,34444.,34486.,34528.,34570.,34612.,34654.,34696.,34738.,34780.,34822.,34864.,34906.,34948.,34990.,35032.,35074.,35116.,35158.,35200.,35242.,35284.,35326.,35368.,35410.,35452.,35494.,35536.,35578.,35620.,35662.,35704.,35746.,35788.,35830.,35872.,35914.,35956.,36000.,36042.,36084.,36126.,36168.,36210.,36252.,36294.,36336.,36378.,36420.,36462.,36504.,36546.,36588.,36630.,36672.,36714.,36756.,36798.,36840.,36882.,36924.,36966.,37008.,37050.,37092.,37134.,37176.,37218.,37260.,37302.,37344.,37386.,37428.,37470.,37512.,37554.,37596.,37638.,37680.,37722.,37764.,37806.,37848.,37890.,37932.,37974.,38016.,38058.,38100.,38142.,38184.,38226.,38268.,38310.,38352.,38394.,38436.,38478.,38520.,38562.,38604.,38646.,38688.,38730.,38772.,38814.,38856.,38898.,38940.,38982.,39024.,39066.,39108.,39150.,39192.,39234.,39276.,39318.,39360.,39402.,39444.,39486.,39528.,39570.,39612.,39654.,39696.,39738.,39780.,39822.,39864.,39906.,39948.,39990.,40032.,40074.,40116.,40158.,40200.,40242.,40284.,40326.,40368.,40410.,40452.,40494.,40536.,40578.,40620.,40662.,40704.,40746.,40788.,40830.,40872.,40914.,40956.,41000.,41042.,41084.,41126.,41168.,41210.,41252.,41294.,41336.,41378.,41420.,41462.,41504.,41546.,41588.,41630.,41672.,41714.,41756.,41798.,41840.,41882.,41924.,41966.,42008.,42050.,42092.,42134.,42176.,42218.,42260.,42302.,42344.,42386.,42428.,42470.,42512.,42554.,42596.,42638.,42680.,42722.,42764.,42806.,42848.,42890.,42932.,42974.,43016.,43058.,43100.,43142.,43184.,43226.,43268.,43310.,43352.,43394.,43436.,43478.,43520.,43562.,43604.,43646.,43688.,43730.,43772.,43814.,43856.,43898.,43940.,43982.,44024.,44066.,44108.,44150.,44192.,44234.,44276.,44318.,44360.,44402.,44444.,44486.,44528.,44570.,44612.,44654.,44696.,44738.,44780.,44822.,44864.,44906.,44948.,44990.,45032.,45074.,45116.,45158.,45200.,45242.,45284.,45326.,45368.,45410.,45452.,45494.,45536.,45578.,45620.,45662.,45704.,45746.,45788.,45830.,45872.,45914.,45956.,46000.,46042.,46084.,46126.,46168.,46210.,46252.,46294.,46336.,46378.,46420.,46462.,46504.,46546.,46588.,46630.,46672.,46714.,46756.,46798.,46840.,46882.,46924.,46966.,47008.,47050.,47092.,47134.,47176.,47218.,47260.,47302.,47344.,47386.,47428.,47470.,47512.,47554.,47596.,47638.,47680.,47722.,47764.,47806.,47848.,47890.,47932.,47974.,48016.,48058.,48100.,48142.,48184.,48226.,48268.,48310.,48352.,48394.,48436.,48478.,48520.,48562.,48604.,48646.,48688.,48730.,48772.,48814.,48856.,48898.,48940.,48982.,49024.,49066.,49108.,49150.,49192.,49234.,49276.,49318.,49360.,49402.,49444.,49486.,49528.,49570.,49612.,49654.,49696.,49738.,49780.,49822.,49864.,49906.,49948.,49990.,50032.,50074.,50116.,50158.,50200.,50242.,50284.,50326.,50368.,50410.,50452.,50494.,50536.,50578.,50620.,50662.,50704.,50746.,50788.,50830.,50872.,50914.,50956.,51000.,51042.,51084.,51126.,51168.,51210.,51252.,51294.,51336.,51378.,51420.,51462.,51504.,51546.,51588.,51630.,51672.,51714.,51756.,51798.,51840.,51882.,51924.,51966.,52008.,52050.,52092.,52134.,52176.,52218.,52260.,52302.,52344.,52386.,52428.,52470.,52512.,52554.,52596.,52638.,52680.,52722.,52764.,52806.,52848.,52890.,52932.,52974.,53016.,53058.,53100.,53142.,53184.,53226.,53268.,53310.,53352.,53394.,53436.,53478.,53520.,53562.,53604.,53646.,53688.,53730.,53772.,53814.,53856.,53898.,53940.,53982.,54024.,54066.,54108.,54150.,54192.,54234.,54276.,54318.,54360.,54402.,54444.,54486.,54528.,54570.,54612.,54654.,54696.,54738.,54780.,54822.,54864.,54906.,54948.,54990.,55032.,55074.,55116.,55158.,55200.,55242.,55284.,55326.,55368.,55410.,55452.,55494.,55536.,55578.,55620.,55662.,55704.,55746.,55788.,55830.,55872.,55914.,55956.,56000.,56042.,56084.,56126.,56168.,56210.,56252.,56294.,56336.,56378.,56420.,56462.,56504.,56546.,56588.,56630.,56672.,56714.,56756.,56798.,56840.,56882.,56924.,56966.,57008.,57050.,57092.,57134.,57176.,57218.,57260.,57302.,57344.,57386.,57428.,57470.,57512.,57554.,57596.,57638.,57680.,57722.,57764.,57806.,57848.,57890.,57932.,57974.,58016.,58058.,58100.,58142.,58184.,58226.,58268.,58310.,58352.,58394.,58436.,58478.,58520.,58562.,58604.,58646.,58688.,58730.,58772.,58814.,58856.,58898.,58940.,58982.,59024.,59066.,59108.,59150.,59192.,59234.,59276.,59318.,59360.,59402.,59444.,59486.,59528.,59570.,59612.,59654.,59696.,59738.,59780.,59822.,59864.,59906.,59948.,59990.,60032.,60074.,60116.,60158.,60200.,60242.,60284.,60326.,60368.,60410.,60452.,60494.,60536.,60578.,60620.,60662.,60704.,60746.,60788.,60830.,60872.,60914.,60956.,61000.,61042.,61084.,61126.,61168.,61210.,61252.,61294.,61336.,61378.,61420.,61462.,61504.,61546.,61588.,61630.,61672.,61714.,61756.,61798.,61840.,61882.,61924.,61966.,62008.,62050.,62092.,62134.,62176.,62218.,62260.,62302.,62344.,62386.,62428.,62470.,62512.,62554.,62596.,62638.,62680.,62722.,62764.,62806.,62848.,62890.,62932.,62974.,63016.,63058.,63100.,63142.,63184.,63226.,63268.,63310.,63352.,63394.,63436.,63478.,63520.,63562.,63604.,63646.,63688.,63730.,63772.,63814.,63856.,63898.,63940.,63982.,64024.,64066.,64108.,64150.,64192.,64234.,64276.,64318.,64360.,64402.,64444.,64486.,64528.,64570.,64612.,64654.,64696.,64738.,64780.,64822.,64864.,64906.,64948.,64990.,65032.,65074.,65116.,65158.,65200.,65242.,65284.,65326.,65368.,65410.,65452.,65494.,65536.,65578.,65620.,65662.,65704.,65746.,65788.,65830.,65872.,65914.,65956.,66000.,66042.,66084.,66126.,66168.,66210.,66252.,66294.,66336.,66378.,66420.,66462.,66504.,66546.,66588.,66630.,66672.,66714.,66756.,66798.,66840.,66882.,66924.,66966.,67008.,67050.,67092.,67134.,67176.,67218.,67260.,67302.,67344.,67386.,67428.,67470.,67512.,67554.,67596.,67638.,67680.,67722.,67764.,67806.,67848.,67890.,67932.,67974.,68016.,68058.,68100.,68142.,68184.,68226.,68268.,68310.,68352.,68394.,68436.,68478.,68520.,68562.,68604.,68646.,68688.,68730.,68772.,68814.,68856.,68898.,68940.,68982.,69024.,69066.,69108.,69150.,69192.,69234.,69276.,69318.,69360.,69402.,69444.,69486.,69528.,69570.,69612.,69654.,69696.,69738.,69780.,69822.,69864.,69906.,69948.,69990.,70032.,70074.,70116.,70158.,70200.,70242.,70284.,70326.,70368.,70410.,70452.,70494.,70536.,70578.,70620.,70662.,70704.,70746.,70788.,70830.,70872.,70914.,70956.,71000.,71042.,71084.,71126.,71168.,71210.,71252.,71294.,71336.,71378.,71420.,71462.,71504.,71546.,71588.,71630.,71672.,71714.,71756.,71798.,71840.,71882.,71924.,71966.,72008.,72050.,72092.,72134.,72176.,72218.,72260.,72302.,72344.,72386.,72428.,72470.,72512.,72554.,72596.,72638.,72680.,72722.,72764.,72806.,72848.,72890.,72932.,72974.,73016.,73058.,73100.,73142.,73184.,73226.,73268.,73310.,73352.,73394.,73436.,73478.,73520.,73562.,73604.,73646.,73688.,73730.,73772.,73814.,73856.,73898.,73940.,73982.,74024.,74066.,74108.,74150.,74192.,74234.,74276.,74318.,74360.,74402.,74444.,74486.,74528.,74570.,74612.,74654.,74696.,74738.,74780.,74822.,74864.,74906.,74948.,74990.,75032.,75074.,75116.,75158.,75200.,75242.,75284.,75326.,75368.,75410.,75452.,75494.,75536.,75578.,75620.,75662.,75704.,75746.,75788.,75830.,75872.,75914.,75956.,76000.,76042.,76084.,76126.,76168.,76210.,76252.,76294.,76336.,76378.,76420.,76462.,76504.,76546.,76588.,76630.,76672.,76714.,76756.,76798.,76840.,76882.,76924.,76966.,77008.,77050.,77092.,77134.,77176.,77218.,77260.,77302.,77344.,77386.,77428.,77470.,77512.,77554.,77596.,77638.,77680.,77722.,77764.,77806.,77848.,77890.,77932.,77974.,78016.,78058.,78100.,78142.,78184.,78226.,78268.,78310.,78352.,78394.,78436.,78478.,78520.,78562.,78604.,78646.,78688.,78730.,78772.,78814.,78856.,78898.,78940.,78982.,79024.,79066.,79108.,79150.,79192.,79234.,79276.,79318.,79360.,79402.,79444.,79486.,79528.,79570.,79612.,79654.,79696.,79738.,79780.,79822.,79864.,79906.,79948.,79990.,80032.,80074.,80116.,80158.,80200.,80242.,80284.,80326.,80368.,80410.,80452.,80494.,80536.,80578.,80620.,80662.,80704.,80746.,80788.,80830.,80872.,80914.,80956.,81000.,81042.,81084.,81126.,81168.,81210.,81252.,81294.,81336.,81378.,81420.,81462.,81504.,81546.,81588.,81630.,81672.,81714.,81756.,81798.,81840.,81882.,81924.,81966.,82008.,82050.,82092.,82134.,82176.,82218.,82260.,82302.,82344.,82386.,82428.,82470.,82512.,82554.,82596.,82638.,82680.,82722.,82764.,82806.,82848.,82890.,82932.,82974.,83016.,83058.,83100.,83142.,83184.,83226.,83268.,83310.,83352.,83394.,83436.,83478.,83520.,83562.,83604.,83646.,83688.,83730.,83772.,83814.,83856.,83898.,83940.,83982.,84024.,84066.,84108.,84150.,84192.,84234.,84276.,84318.,84360.,84402.,84444.,84486.,84528.,84570.,84612.,84654.,84696.,84738.,84780.,84822.,84864.,84906.,84948.,84990.,85032.,85074.,85116.,85158.,85200.,85242.,85284.,85326.,85368.,85410.,85452.,85494.,85536.,85578.,85620.,85662.,85704.,85746.,85788.,85830.,85872.,85914.,85956.,86000.,86042.,86084.,86126.,86168.,86210.,86252.,86294.,86336.,86378.,86420.,86462.,86504.,86546.,86588.,86630.,86672.,86714.,86756.,86798.,86840.,86882.,86924.,86966.,87008.,87050.,87092.,87134.,87176.,87218.,8

```

74 LAMDA1=CSORT(LAMDA**2+CP**2+PI**2*PI**2*MIU1**2/SIGF)
77 LAMDA2=CSORT(LAMDA**2+CP**2+SI**2*PI**2*PI**2*MIU2**2/SIGFE)
78 LAMDA3=CSORT(LAMDA**2+CR**2+SI**2*PI**2*PI**2*MIU3**2/SIGFF)
79 LAMDA4=CSORT(LAMDA**2+CR**2+SI**2*PI**2*PI**2*MIU4**2/SIGFF)
80 IF(SIN(I*3.*ALFA*O).LT.0.0001)KB1=P
81 IF(SIN(I*3.*ALFA*O).GE.0.0001)KB1=SIN(P*I*3.*O*ALFA)/SIN(I*3
82 I*ALFA)
83 IF(SIN(I*Q*ALFA-PI/3.).GE.0.0001)KB2=SIN(3.*I*ALFA*Q-PI)/SIN
84 I*ALFA-PI/3.)
85 IF(SIN(I*Q*ALFA-PI/3.).LT.0.0001)KB2=3.
86 IF(SIN(I*ALFA/2.).LT.0.0001)KB3=0
87 IF(SIN(I*ALFA/2.).GE.0.0001)KB3=SIN(Q*I*ALFA/2.)/SIN(I*ALFA/
88 KB=KB1+KB2*KB3*(SIN(I*3.*Q*ALFA/2.))**2)
89 KT=((C/R)**2/((C/R)**2-N**2))-((1/N)*SIN(PI*N*(A+R)/(2.*C))
90 **COS(PI*N*(A/(2.*C))))
91 Z3=LAMDA3*MIU4/(LAMDA4*MIU3)
92 CP3=(CASH(LAMDA3*D3)+Z3*SINH(LAMDA3*D3))/
93 -(Z3*CASH(LAMDA3*D3)+SINH(LAMDA3*D3))
94 Z2=LAMDA2*MIU3/(LAMDA3*MIU2*CP3)

```

LINIA7 24/06/76 09.40.40

```

95 CP2=(CASH(LAMDA2*D2)+Z2*SINH(LAMDA2*D2))/
96 -(Z2*CASH(LAMDA2*D2)+SINH(LAMDA2*D2))
97 Z1=LAMDA1*MIU2/(LAMDA2*MIU1*CP2)
98 CP1=(CASH(LAMDA1*D1)+Z1*SINH(LAMDA1*D1))/
99 -(Z1*CASH(LAMDA1*D1)+SINH(LAMDA1*D1))
100 ZAI=LAMDA1*MIU1/(LAMDA1*MIU1*CP1)
101 CPA=(CASH(LAMDA1*DAL)+ZAI*SINH(LAMDA1*DAL))/
102 *(ZAI+CASH(LAMDA1*DAL)+SINH(LAMDA1*DAL))
103 CP=CPA*LAMDA1*MIU1/(MIU1*LAMDA1)
104 CO=16*MIU1*W*I1*1.41*KB/(PI*L*LAMDA*(SINH(LAMDA*O)
105 +CO*COSH(LAMDA*O))*KT*(CFYP(CR*PI/3.)))
106 CA=CO
107 C1=CA*(CASH(LAMDA1*DAL)-CPA*SINH(LAMDA1*DAL))
108 C2=C1*(CASH(LAMDA1*D1)-CP1*SINH(LAMDA1*D1))
109 C3=C2*(CASH(LAMDA2*D2)-CP2*SINH(LAMDA2*D2))
110 C4=C3*(CASH(LAMDA3*D3)-CP3*SINH(LAMDA3*D3))
111 H1=CARS(C1*LAMDA1*CP1)/MIU1
112 H2=CARS(C2*LAMDA2*CP2)/MIU2
113 H3=CARS(C3*LAMDA3*CP3)/MIU3
114 H4=CARS(C4*LAMDA4)/MIU4
115 HP1=SORT(HP1**2+H1**2)
116 HP2=SORT(HP2**2+H2**2)
117 HP3=SORT(HP3**2+H3**2)
118 HP4=SORT(HP4**2+H4**2)
119 IF(LL.LT.0.) GO TO 30
120 CONTINUE
121 30 CONTINUE
122 DO 60 KK=1,40
123 IF(HP1.GE.0.0.AND.HP1.LE.42.0) MIUK1=950.*MIU1
124 IF(HP2.GE.0.0.AND.HP2.LE.42.0) MIUK2=950.*MIU2
125 IF(HP3.GE.0.0.AND.HP3.LE.42.0) MIUK3=950.*MIU3
126 IF(HP4.GE.0.0.AND.HP4.LE.42.0) MIUK4=950.*MIU4
127 IF(H(KK).LE.HP1.AND.HP1.LE.H(KK+1)) MIUK1=(0.05*KK+(HP1-H(KK
128 15)/(H(KK+1)-H(KK)))/HP1
129 IF(H(KK).LE.HP2.AND.HP2.LE.H(KK+1)) MIUK2=(0.05*KK+(HP2-H(KK
130 15)/(H(KK+1)-H(KK)))/HP2
131 IF(H(KK).LE.HP3.AND.HP3.LE.H(KK+1)) MIUK3=(0.05*KK+(HP3-H(KK
132 15)/(H(KK+1)-H(KK)))/HP3
133 IF(H(KK).LE.HP4.AND.HP4.LE.H(KK+1)) MIUK4=(0.05*KK+(HP4-H(KK
134 15)/(H(KK+1)-H(KK)))/HP4
135 IF(HP1.GE.6000) MIUK1=(0.05*HP1+5250.)/(HP1+3000)
136 IF(HP2.GE.6000) MIUK2=(0.05*HP2+5250.)/(HP2+3000)
137 IF(HP3.GE.6000) MIUK3=(0.05*HP3+5250.)/(HP3+3000)
138 IF(HP4.GE.6000) MIUK4=(0.05*HP4+5250.)/(HP4+3000)
139 60 CONTINUE
140 IF(ARS((MIUK1-MIU1)/MIU1).LE.0.100.AND.
141 ARS((MIUK2-MIU2)/MIU2).LE.0.100.AND.

```

LINIA7 24/06/76 09.40.40

```

142 ARS((MIUK3-MIU3)/MIU3).LE.0.100.AND.
143 ARS((MIUK4-MIU4)/MIU4).LE.0.100) GO TO 81
144 BATA=0.9
145 MIU1=MIU1+BATA*(MIUK1-MIU1)
146 MIU2=MIU2+BATA*(MIUK2-MIU2)
147 MIU3=MIU3+BATA*(MIUK3-MIU3)
148 MIU4=MIU4+BATA*(MIUK4-MIU4)
149 H=H+1
150 IF(U.GT.50.0) GO TO 81
151 GO TO 4
152 WRITE(10P,99) MIU1,MIU2,MIU3,MIU4,11,S
153 99 FORMAT(10Y,'MIU1=',F10.4,'MIU2=',F10.4,'MIU3=',F10.4,'MIU4='
154 *,F10.4,'S=',F10.4)
155 SA=0.
156 PIERRE=0.0
157 PHTERE=0.
158 UORNE=0.0
159 FX1=0.0
160 FY1=0.0
161 HPOE=70 0 0 0

```

TX=0.0
ST=(0.0,0.0,0)
SHT=(0.0,0.0,0)

CALCULUL PERFORMANTELOR MASINI

```
DO 31 N=1,7.2  
IF (LL.LT.0.) GO TO 4  
D1 21 T=1.1M  
9 SI=1-T+T1-S)*3+ALFA/PI*Q  
LANDA=SQRT(4*I+2*PI**2/L**2+(N*PI/(2*C))**2)  
LANDA1=CSORT(LANDA**2+CP*CT**2+PT*F*MTI10+CTCA1)  
LANDA2=CSORT(LANDA**2+CP*CT**2+PT*F*MTI11+CTCF1)  
LANDA3=CSORT(LANDA**2+CP*CT**2+PT*F*MTI12+CTCF2)  
LANDA4=CSORT(LANDA**2+CP*CT**2+PT*F*MTI13+CTCF3)  
LANDA5=CSORT(LANDA**2+CP*CT**2+PT*F*MTI14+CTCF4)  
LANDR1=RFAL(LANDA1)  
LANDR2=RFAL(LANDA2)  
LANDR3=RFAL(LANDA3)  
LANDR4=RFAL(LANDA4)  
LANDR5=RFAL(LANDA5)  
LANDI1=AIMAG(LANDA1)  
LANDI2=AIMAG(LANDA2)  
LANDI3=AIMAG(LANDA3)
```

LINTA7 24/06/76 09.40.40

```
LANDI4 = AIMAG(LANDA4)  
IF (SIN(I+3.*ALFA-Q).LT.0.0001)KB1=0  
IF (SIN(I+3.*ALFA+Q).GE.0.0001)KB1=SIN(P+I+3.*Q*ALFA)/SIN(I+3.*Q*ALFA)  
IF (SIN(I+Q*ALFA-PI/3.).GE.0.0001)KB2=SIN(3.*I+ALFA+Q-PI)/SIN(I+Q*ALFA-PI/3.)  
IF (SIN(I+Q*ALFA-PI/3.).LT.0.0001)KB2=3.  
IF (SIN(I+ALFA/2.).LT.0.0001)KB3=0  
IF (SIN(I+ALFA/2.).GE.0.0001)KB3=SIN(Q*I*ALFA/2.)/SIN(I*ALFA/2.)  
K9=KB1+KB2+KB3*(SIN(I+3.*Q*ALFA/2.))**2  
KT=((C/R)**2/(C/R)**2-N**2)*((1/N)*SIN(PI*N*(A+R)/(2.*C))-(R/2.*C))  
Z3=LANDA3*MTI13/(LANDA4*MTI13)  
CP3=((CASH(LANDA3*D3)+Z3*SINH(LANDA3*D3))/  
-(Z3*CASH(LANDA3*D3)+SINH(LANDA3*D3)))/  
Z2=LANDA2*MTI12/(LANDA3*MTI12*CP3)  
CP2=((CASH(LANDA2*D2)+Z2*SINH(LANDA2*D2))/  
-(Z2*CASH(LANDA2*D2)+SINH(LANDA2*D2)))/  
Z1=LANDA1*MTI11/(LANDA2*MTI11*CP2)  
CP1=((CASH(LANDA1*D1)+Z1*SINH(LANDA1*D1))/  
-(Z1*CASH(LANDA1*D1)+SINH(LANDA1*D1)))/  
ZAL=LANDAL*MTI1/(LANDA1*MTI1*CP1)  
CPA=((CASH(LANDAL*DAL)+ZAL*SINH(LANDAL*DAL))/  
-(ZAL*CASH(LANDAL*DAL)+SINH(LANDAL*DAL)))/  
C=C*CPA*LANDAL*MTI1/(MTI10*LANDA)  
C=10*MTI10*A*I1*1.41*KB/(PI*L*LANDA*(SINH(LANDA*D)  
+C*CASH(LANDA*D)))*KT*(C*F*Y/(C*P*Y/3.))  
C1=C*CP1*(CASH(LANDAL*DAL)-CPA*SINH(LANDAL*DAL))  
C2=C*CP2*(CASH(LANDA1*D1)-CP1*SINH(LANDA1*D1))  
C3=C*CP3*(CASH(LANDA2*D2)-CP2*SINH(LANDA2*D2))  
C4=C*CP4*(CASH(LANDA3*D3)-CP3*SINH(LANDA3*D3))  
CONCA=CONJG(CA)  
CONCPA=CONJG(CPA)  
CONC1=CONJG(C1)  
CONC2=CONJG(C2)  
CONC3=CONJG(C3)  
CONC4=CONJG(C4)  
CONCP1=CONJG(CP1)  
CONCP2=CONJG(CP2)  
CONCP3=CONJG(CP3)  
CONC4=1.  
NA=CA  
NA=(CABS(CA)**2)+0.5*SIGAL*((SI*OMEGA)**2)*(L+3)*C*(LANDA**2)/  
1*(2*PI+I)**2  
M1=(CABS(C1)**2)+0.5*SIGFE*((SI*OMEGA)**2)*(L+3)*C*(LANDA**2)/  
LINTA7 24/06/76 09.40.40
```

```
1*(2*PI+I)**2  
M2=(CABS(C2)**2)+0.5*SIGFE*((SI*OMEGA)**2)*(L+3)*C*(LANDA**2)/  
1*(2*PI+I)**2  
M3=(CABS(C3)**2)+0.5*SIGFE*((SI*OMEGA)**2)*(L+3)*C*(LANDA**2)/  
1*(2*PI+I)**2  
M4=(CABS(C4)**2)+0.5*SIGFE*((SI*OMEGA)**2)*(L+3)*C*(LANDA**2)/  
1*(2*PI+I)**2  
P1=PI*(SIN(2*LANDA1*DA)*(CP1+CONCP1-1)/(4*LANDA1)-SINH(2*LANDA1*DA)  
+CPA*CONCPA+1)/(2*LANDA1)+COS(2*LANDA1*DA)-1)*AIMAG(CPA)/(2*LANDA1)  
P2=PI*(SIN(2*LANDA2*DA)*(CP2+CONCP2-1)/(4*LANDA2)-SINH(2*LANDA2*DA)  
+CP1*CONCP1+1)/(2*LANDA2)+COS(2*LANDA2*DA)-1)*AIMAG(CP1)/(2*LANDA2)  
P3=PI*(SIN(2*LANDA3*DA)*(CP3+CONCP3-1)/(4*LANDA3)-SINH(2*LANDA3*DA)  
+CP2*CONCP2+1)/(2*LANDA3)+COS(2*LANDA3*DA)-1)*AIMAG(CP2)/(2*LANDA3)  
P4=PI*(SIN(2*LANDA4*DA)*(CP4+CONCP4-1)/(4*LANDA4)-SINH(2*LANDA4*DA)  
+CP3*CONCP3+1)/(2*LANDA4)+COS(2*LANDA4*DA)-1)*AIMAG(CP3)/(2*LANDA4)
```

```

251 1 1/2*(COSH(2*LANDR3+D3)-1)+2*REAL(CP3)/(2*LANDR3))
252 P2=(C3+(SIN(2*LANDI3+D3)*(CP3+CONCP3-1)/(4*LANDI3)-SINH(2*LAN
253 1)+(CP3+CONCP3+1)/(4*LANDR3)+(COS(2*LANDI3+D3)-1)*AIMAG(CP3)
254 1 DI3)+(COSH(2*LANDR3+D3)-1)*REAL(CP3)/(2*LANDR3))
255 P4=PI/2*(2*LANDR4)
256 P5=CABS(P1)
257 P6=CABS(P2)
258 P7=CABS(P3)
259 P8=P4
260 P9=CABS(PA)
261 PUTERE=PUTERE+P5+P6+P7+P8+P9
262 SR=(LANDA**3)*(2+C)*L*(CABS(CO)**2)+OMEGA*(L/(2*PI*I))**2*CC
263 /4*MIUO)
264 S1=S3+S2
265 S1=0.5*1+1.41*CE*OMEGA*W*8*(2+C)*KB*KT*CO*(LANDA**2)*(COSH(
266 1 D)+C)*SINH(LANDA*D)))*CEXP(-CB*PI/3)/(PI*(1+PT/1)**2)
267 CT=T2+S1
268 FX2=C*(L**2)*(LANDA**3)*(CABS(CO)**2)*AIMAG(CP)/(4*PI*MIUO*I
269 FY2=C*(L**3)*(LANDA**4)*(CABS(CO)**2)*(1-CABS(CP)**2)/(16*P
270 1 I*TIU)*I**2)
271 FX1=FX1+FX2
272 FY1=FY1+FY2
273 FP1=C*L**3*CONJG(LANDAL)*(CABS(CA)**2)*CONCPA *SI*OMEGA*(-
274 1 LANDA**2/(2*MIUO*(2*PT*I)**2)
275 PA=DA1+REAL(PP1)
276 FX=FY-(AIMAG(S2)+P5+P6+P7+P8+P9)/(2*TAU*F*(1-S))
277 FA=PA+REAL(PP1)-AIMAG(S2)/(2*TAU*F*(1-S))
278 TFNS=OMEGA*W*2*(L**2)*(2*A)*K31*KT*CH*CO*(LANDA**2)*
279 *(COSH(LANDA*D)+C)*SINH(LANDA*D))/(PI*(1+PT**2))
280 + (SIN(I*S*ALFA/2)**2)*CEXP(CB*2*I+Q*ALFA)
281 UPOF=UPOF+TFNS
282 IF(ALL.LT.O.) GO TO 31

```

LINIA7 24/06/76 09.40.40

```

283 21 CONTINUE
284 31 CONTINUE
285 SR=REAL(ST)
286 SA=AIMAG(ST)
287 CT=SR/(3.*CABS(UPOF))*1.41
288 CPTC=SO/(3.*CABS(UPOF))*1.41
289 R2=PA1/(3.*(C T2**2))*(-1)
290 XM=CABS(UPOF)/CRTO
291 CALITA=XM/R2
292 CL=CALITA
293 IF(ALL.LT.O.) WRITE(108,211)
294 211 FORMAT(/,16X,'S-A DETERMINAT FACTORUL DE CALITATE'//)
295 WRITE(108,104) CT2,CRTO,UPOF,R2,XM,CALITA
296 IF(ALL.LT.O.) GO TO 5

```

C O L O C

TIPARIREA PERFORMANTELOR ENERGETICE

```

300 FORTA=(SR-PUTERE)/(2*TAU*F*(1-S))
301 P1=1+R1*T1**2
302 P2=1+X0*T1**2
303 CT=SR+PR
304 QT=PY+S2
305 WRITE(108,101) FX1,FY1
306 101 FORMAT(10X,'FORTA CALCULATA DIN TENSORUL MAXWELL FX1=',E10.4
307 1 'F10.4)
308 WRITE(108,92) FX,FORTA
309 92 FORMAT(10X,'FORTA CALCULATA DIN PUTERE-PIERDERI FX=',E10.4,'
310 1 '=,E10.4/)
311 WRITE(108,93) FA,SR,SO
312 93 FORMAT(10X,'FORTA CALCULATA DIN VECTORUL POYNTING FA=',E10.4
313 1 'F+H=',E10.4,'IM F+H=',E10.4/)
314 WRITE(108,91) S3,ST
315 91 FORMAT(10X,'PUTERE CALCULATA CU VECT POYNTING=',2E10.4/10X,'
316 1 PUTERE CALCULATA DIN BUT FAZEIOR=',2E10.4/)
317 STMOD=CABS(ST)
318 104 FORMAT(16X,'I2=',E10.4//16X,'I0=',E10.4//16X,'UE=',2E10.4//
319 1 '=,E10.4//16X,'XM=',E10.4//16X,'CALITATE=',F10.4)
320 STOP
321 END

```

LINIA7 24/06/76 09.41.59

```

1 COMPLEX FUNCTION SANH(Z)
2 COMPLEX Z
3 SANH=(CEXP(Z)-CEXP(-Z))/2.
4 RETURN
5 END

```

LINIA7 24/06/76 09.42.05

```

1 COMPLEX FUNCTION CASH(U)
2 COMPLEX U
3 CASH=(CEXP(U)+CEXP(-U))/2.
4 RETURN
5 END

```

MODULE	I	TYPE	C	LONGUEUR	0140 (00320)
MODULE	E	TYPE	C	LONGUEUR	0140 (00320)
MODULE	FXM DATA	TYPE	P	LONGUEUR	4040 (10520)
MODULE	SANH	TYPE	P	LONGUEUR	0090 (00224)
MODULE	CASH	TYPE	P	LONGUEUR	0008 (00216)

ILATION (PLUS HAUT NIVEAU D'ERREUR RENCONTRE = 0) 09.42:11

3 LINIA/ AN = PUSO PH = 0001 DATE = 24/06/76
 FB = 09H 40M 21S HIFIN = 09H 42M 14S IPTVT = 00007544
 = 00018 MEM = 00011 IO = 000400 IN = 00349 OUT = 00000
 # 01 CP = 01 CR = 01

EDITION DE LIENS

8 LINIA/ AN = PUSO PH = 0002 DATE = 24/06/76
 FB = 09H 42M 14S HIFIN = 09H 43M 23S IPTVT = 00001379
 = 00018 MEM = 00011 IO = 000014 IN = 00000 OUT = 00000
 # 01 CP = 01 CR = 01

0.0.NL:4000.TIME:100

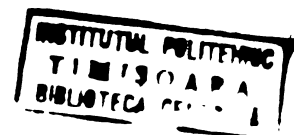
809E-03MIU2 = .6470E-03MIU3 = .1190E-02MIU4 = .1193E-02I1 = .3689E+03S = 19000

MA DETERMINAT FACTORUL DE CALITATE

I = .3910E+04
 IE = .3062E+04
 IZ = -.3770E+01 - .2964E+01
 J = .7929E-03
 JZ = .1560E-02

ALITATE = .2000E+01
 DE ARMONICI = .9000E+02LL .3522E+00
 I735E-03MIU2 = .6168E-03MIU3 = .1190E-02MIU4 = .1193E-02I1 = .3689E+03S = 19000
 P = .2520E+04

D = .3141E+04
 E = -.7253E+01 - .7429E+01
 P = .2593E-02
 = .3305E-02



LITATE = .1275E+01
 ICHILATA DIN TENSORUL MAXWELL FX1 = .2504E+04FY1 = -.4414E+04
 ICHILATA DIN PUTERE-DIFRACAT FX = .2504E+04FY = .2504E+04
 LOCALATA DIN VECTORUL POYNTING FA = .2504E+04REAL E+H = .5567E+05IM E+H = .69
 CALCULATA CU VECT POYNTING = .1230E+05 - .5567E+05
 TERE CALCULATA DIN OUT FAPELOR = .5567E+05 .6939E+05

8 LINIA/ AN = PUSO PH = 0003 DATE = 24/06/76
 FB = 09H 43M 23S HIFIN = 09H 53M 24S IPTVT = 00099870


```

CONCPA=1.
DA=DAI.
S2=(LANDA**3)*(2+C)*L*(CABS(CO)**2)*OMEGA*(L/(2*PI*I))**2+CONCP
1/(A*YTHO)
S1=S2+S2
S1=1.41+CR*OMEGA**2*(2+L)*C*KT+CO*(LANDA**2)*(COSH(LA
1D)+CP*SINH(LANDA*D))*CEXP(-C*PI/3)/(PI*(1+2*PI/L)**2)
ST=ST+S1
FY2=C*(L**2)*(LANDA**3)*(CABS(CO)**2)*AIMAG(CO)/(4*PI*I**2)
FY2=C*(L**3)*(LANDA**4)*(CABS(CO)**2)*(1-CABS(CO)**2)/(14*PI**
1*YTHO+I**2)
FY1=FX1+FY2
FY2=FY1+FY2
PP=C+L**3*CONJG(LANDA)*CABS(CA)**2*CONCPA *SI*OMEGA*(-1)*
LANDA**2/(2*YTHO+(2*PI*I)**2)
PA1=PA1+REAI(CP1)
PA=FA+(REAL(PP1)-AIMAG(S2))/(2*TAU+F*(1-S1))
TENS=OMEGA**2*(L**2)*(2+A)*KB1*KT+CB*CO*(LANDA**2)*
S(COSH(LANDA*D)+CP*SINH(LANDA*D))/(PI**3*(I**2))*
+(SIN(Y**3*ALFA/2)**2)*CEXP(CB*2.*T**0*ALFA)
URDFUORF=TENS
IF(LL.IT.0) GO TO 31
21 CONTINUE
31 CONTINUE
SP=PAI(ST)
SO=AIMAG(ST)
CRTO=SR/(3+CABS(HBOR))+1.41
CRTO=SO/(3+CABS(HBOR))+1.41
R2=PA1/(3+(C*TA**2))+(-1)
XM=CABS(HBOR)/CRTO
CALITA=XM/R2
GI=CALITA
WRITE(108,100) GL
IF(LL.IT.0) WRITE(108,211)
211 FORMAT(//16X,'S-A DETERMINAT FACTORUL DE CALITATE'//)
IF(LL.IT.0) GO TO 5
WRITE(108,104) ST,CRTO,URDF,R2,XM,CALITA

```

TIPARIRZA PERFORMANTELOR ENERGETICE

```

PR=3.*R1*I1**2
OY=3.*X0*I1**2
PT=SP+PR
QT=QX+SQ
WRITE(108,101) FY1,FY1
101 FORMAT(10Y,'FORA CALCULATA DIN TENSORUL MAXWELL FX1=',F10.4,'F
LINTA7 04/10/76 18.40.52
1.'F10.4)
WRITE(108,93) FA,SR,SO
93 FORMAT(10Y,'FORA CALCULAT: DIN VECTORUL POYNTING FA=',F10.4,'F
1.'F10.4,'YH=',F10.4//)
WRITE(108,91) ST,ST
91 FORMAT(10Y,'PUTRE CALCULATA CU VPCT POYNTING=',F10.4//16Y,'
1.'OUTRE CALCULAT: DIN PUT FAZIOR=',F10.4//)
STNOC=CABS(ST)
104 FORMAT(16Y,'I2=',F10.4//16X,'I0=',F10.4//16Y,'UE=',F10.4//16X,
1.'=',F10.4//16Y,'XM=',F10.4//16Y,'CALITATE=',F10.4)
17 CONTINUE
STOP
END

```

LINIA7 04/10/76 18.40.34

```

COMPLEX FUNCTION SANH(Z)
COMPLEX Z
SANH=(CEXP(Z)-CEXP(-Z))/2.
RETURN
END

```

LINIA7 04/10/76 18.40.40

```

COMPLEX FUNCTION CASH(U)
COMPLEX U
CASH=(CEXP(U)+CEXP(-U))/2.
RETURN
END

```

LINIA7 04/10/76 18.40.40

M.DEB = 1PH 42M 40S M.FIN = 1PH 44M 00S PTOT = 00001317
LOC = 00018 NCM = 00011 LO = 00064 IN = 00000 OUT = 00000
AD:0.0.NL:4000.TIME:100

.1746E-03MIU2 = .2408E-03MIU3 = .4212E-03MIU4 = .1190E-02I1 =
.2503E-03MIU2 = .3517E-03MIU3 = .6271E-03MIU4 = .1190E-02I1 =
.2735E-03MIU2 = .4377E-03MIU3 = .8797E-03MIU4 = .1190E-02I1 =
.3172E-03MIU2 = .4928E-03MIU3 = .1209E-02MIU4 = .1190E-02I1 =
.3705E-03MIU2 = .5241E-03MIU3 = .1418E-02MIU4 = .1190E-02I1 =
.4320E+00F = .5000E+02F2 = .5000E+01P = .3000E+01

S-A DETERMINAT FACTORIUL DE CALITATE

UL DE ARMONICI .4100E+02LL .5974E+00
.1271E-03MIU2 = .2144E-03MIU3 = .4244E-03MIU4 = .1190E-02I1 =
.1531E-03MIU2 = .3083E-03MIU3 = .5630E-03MIU4 = .1190E-02I1 =
.2130E-03MIU2 = .3722E-03MIU3 = .7056E-03MIU4 = .1190E-02I1 =
.2807E-03MIU2 = .4256E-03MIU3 = .8410E-03MIU4 = .1190E-02I1 =
.1320E+00F = .5000E+02F2 = .5000E+01P = .3000E+01

Y2 = .1423E+01
Y0 = .5384E+02
HE = .1197E+02 - .2611E+03
R2 = .9111E+02
XM = .4855E+01

CALITATE = .5329E-01
CALCULATA DIN TENSORUL MAXWELL FY1 = .2004E+02FY1 = .6759E+04
CALCULATA DIN VECTORUL POYNTING FA = .2004E+02REAL E+H = .7013E+03IM E+H =

F CALCULATA CU VECT POYNTING = .1184E+04 - .7913E+03
DIFER CALCULATA DIN PUT FAZELOR = .7013E+03 2994E+05

.1069E-03MIU2 = .1512E-03MIU3 = .2785E-03MIU4 = .1078E-02I1 =
.1288E-03MIU2 = .1748E-03MIU3 = .3047E-03MIU4 = .1112E-02I1 =
.1381E-03MIU2 = .1828E-03MIU3 = .3368E-03MIU4 = .1183E-02I1 =
.1731E-03MIU2 = .1898E-03MIU3 = .3368E-03MIU4 = .1183E-02I1 =
.1320E+00F = .5000E+02F2 = .5000E+01P = .3000E+01

S-A DETERMINAT FACTORIUL DE CALITATE

UL DE ARMONICI .3900E+02LL .5143E+00
.1119E-03MIU2 = .1723E-03MIU3 = .3390E-03MIU4 = .1190E-02I1 =
.1455E-03MIU2 = .2193E-03MIU3 = .4172E-03MIU4 = .1190E-02I1 =
.1620E-03MIU2 = .2524E-03MIU3 = .5020E-03MIU4 = .1190E-02I1 =
.1701E-03MIU2 = .2729E-03MIU3 = .5656E-03MIU4 = .1190E-02I1 =
.1741E-03MIU2 = .2725E-03MIU3 = .5454E-03MIU4 = .1190E-02I1 =
.1320E+00F = .5000E+02F2 = .5000E+01P = .3000E+01

Y2 = .3998E+01
Y0 = .5348E+02
HE = .4402E-01 - .2575E+03
R2 = .2066E+02
XM = .4814E+01

CALITATE = .2330E+00
CALCULATA DIN TENSORUL MAXWELL FY1 = .1291E+03FY1 = .6376E+04
CALCULATA DIN VECTORUL POYNTING FA = .1291E+03REAL E+H = .2130E+04IM E+H =

F CALCULATA CU VECT POYNTING = .1873E+04 - .2130E+04
DIFER CALCULATA DIN PUT FAZELOR = .2130E+04 2030E+05

.1547E-03MIU2 = .2256E-03MIU3 = .2412E-03MIU4 = .1190E-02I1 =
.1633E-03MIU2 = .1183E-03MIU3 = .2449E-03MIU4 = .1190E-02I1 =
.1673E-03MIU2 = .1303E-03MIU3 = .2449E-03MIU4 = .1190E-02I1 =
.1320E+00F = .5000E+02F2 = .2500E+02P = .3000E+01

S-A DETERMINAT FACTORIUL DE CALITATE


```

M1=2+P+C*A*SIGFFI*(V**2)*(LANDA**2)*(CABS(C1)**2)
M2=2+P+C*A*SIGFFI*(V**2)*(LANDA**2)*(CABS(C2)**2)
M3=2+P+C*A*SIGFFI*(V**2)*(LANDA**2)*(CABS(C3)**2)
M4=2+P+C*A*SIGFFI*(V**2)*(LANDA**2)*(CABS(C4)**2)
P1=M1*(SIN(2*LANDI1+D1)+(C1+CC1*(C1-1))/(4*LANDI1)-SINH(2+LANDR1+
1)*((C1+CONCP1+1)/(4*LANDR1)+(COS(2*LANDI1+D1)-1)*AIMAG(C1)/(2+L
1DI1)+(COSH(2*LANDR1+D1)-1)*REAL(C1)/(2*LANDR1))
P2=M2*(SIN(2*LANDI2+D2)+(C2+CC2*(C2-1))/(4*LANDI2)-SINH(2+LANDR2+
1)*((C2+CONCP2+1)/(4*LANDR2)+(COS(2*LANDI2+D2)-1)*AIMAG(C2)/(2+L
1DI2)+(COSH(2*LANDR2+D2)-1)*REAL(C2)/(2*LANDR2))
P3=M3*(SIN(2*LANDI3+D3)+(C3+CC3*(C3-1))/(4*LANDI3)-SINH(2+LANDR3+
1)*((C3+CONCP3+1)/(4*LANDR3)+(COS(2*LANDI3+D3)-1)*AIMAG(C3)/(2+L
1DI3)+(COSH(2*LANDR3+D3)-1)*REAL(C3)/(2*LANDR3))
P4=M4/(2+LANDR4)
P5=CABS(P1)
P6=CABS(P2)
P7=CABS(P3)
P8=F4
PUTERE=P5+P6+P7+P8
PIIT=PIIT+P5+P6+P7+P8
FY2=PIITERF/V
FY2=A*(C**3)*(LANDA**4)*(CABS(CO)**2)*(1-(CABS(CP)**2))
*/(2*(PT**2)*MIIID*(I**2))
FX1=FX1+FX2
FY1=FY1+FY2
30 CONTINUE
20 CONTINUE
101 WRITE(108,101) FY1,FY1
101 FORMAT(10X,'FORTA CALCULATA DIN TENSORUL MAXWELL FX1='.E10.4,'FY
1'.E10.4)
17 CONTINUE
STOP
END

```

LINIAS 09/06/76 14.40:22

```

COMPLEX FUNCTION SANH(Z)
COMPLEX Z
SANH=(CEXP(Z)-CEXP(-Z))/2.
RETURN
END

```

LINIAS 09/06/76 14.40:28

```

COMPLEX FUNCTION CASH(U)
COMPLEX U
CASH=(CEXP(U)+CEXP(-U))/2.
RETURN
END

```

LINIAS 09/06/76 14.40:28

MODULE	E	TYPE	C	LONGUEUR	0140 (00320)
MODULE	E	TYPE	C	LONGUEUR	0140 (00320)
MODULE	F4+DATA	TYPE	P	LONGUEUR	2F29 (11816)
MODULE	SANH	TYPE	P	LONGUEUR	00F0 (00224)
MODULE	CASH	TYPE	P	LONGUEUR	00F0 (00216)

PPIATION (PLUS HAUT NIVEAU D'ERREUR RENCONTRE = 0) 14.40:33
 133 LINIAS AM = PUSO PH = 0001 DATE = 09/06/76
 DEFI = 14H 39M 19S N:PTM = 14H 40M 36S IPTVT = 00004560
 T = 00018 PEM = (0001 10 = IN = OUT = 00000
 I = C?

1 EDITION DE LIENS
 133 LINIAS AM = PUSO PH = 0002 DATE = 09/06/76

PROG6 29/05/76 08.53:29

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100

CALCULUL FRINELOR LINIARE
PROIECTAREA OPTIMALA
PROTOTIP F.L. FRNTRU C.F.

BLOCK DATA
COMMON /E/ H(40)
DATA H/42.84.126.168.210.252.294.336.378.420.462.504
1.546.588.630.672.714.756.798.840.882.924.966.1008.1050
1.108.1134.1176.1218.1260.1302.1344.1386.1428.1470.1512.1554
1.6000.9000.12000.15000./
END.

PROG6 29/05/76 08.53:37

COMMON /E/ H(40)
* COMPLEX CR, LANDA1, LANDA2, LANDA3, LANDA4, SUM, Z3, Z2, Z1, CP3, CP2, CP1,
* C1, C2, C3, C4, P1, P2, P3, P4
* SASH, CASH, CONC1, CONC2, CONC3, CONC4, CONCP1, CONCP2, CONCP3, CONCP
* REAL PI, SIGFE, MIU0, D1, D2, D3, G, A, TAU, P, MIU1, MIU2, MIU3, MIU4, HP1, HP
* HP3, HP4, V, T, N, LANDA, LANDR1, LANDR2, LANDR3, LANDR4, LANDI1, LANDI2, LA
* I3, LANDI4, H, MODSUM, BZPRO, SOI, MIUK1, MIUK2, MIUK3, MIUK4, BATA, U, FORT
* M1, M2, M3, M4,
* H1, H2, H3, H4, P4, P8
* G1Z, GCU, GFE, KU, JCU, ROCU, MIZ, MCU, HC, HJ, MFE, MASA, BETA, ALFA
DO 42 LAPA=1, 5
TAU=0.03+LAPA*0.01
DO 42 KAPA=1, 4
CB=(0.0, 1.0)
PI=3.1459
SIGFE=0.33E+07
MIU0=0.1256E-05
D1=0.0008
D2=0.0002
D3=0.0003
D3=0.0005
AEO=0.032
P=1
C=TAU
RR10=3+(KAPA-1.)/20.)*TAU
G17=20000.
GCI=88890.
GFF=7850.
KI=0.4
JCI=9000000.
ROCU=0.0177E-06
VR=100
U=1
MI11=100*MIU0
MI12=200*MIU0
MI13=500*MIU0
MI14=800*MIU0
HP1=0.0
HP2=0.0
HP3=0.0
HP4=0.0
SUM=(0.0, 0.0)
DO 20 I1=1, 17.2
DO 30 I2=1, 17.2.
I=I1
N=I2

6

```

LANDA1=CSQRT(LANDA**2+C8*STGFF*MIU1*V*I*PI/TAU)
LANDA2=CSQRT(LANDA**2+C8*STGFF*MIU2*V*I*PI/TAU)
LANDA3=CSQRT(LANDA**2+C8*STGFF*MIU3*V*I*PI/TAU)
LANDA4=CSQRT(LANDA**2+C8*STGFF*MIU4*V*I*PI/TAU)
Z3=LANDA3*MIU4/(LANDA3*MIU3)
CP3=(CASH(LANDA3*D3)+Z3*SINH(LANDA3*D3))/
-(Z3*CASH(LANDA3*D3)+SINH(LANDA3*D3))
Z2=LANDA2*MIU3/(LANDA2*MIU2*CP3)
CP2=(CASH(LANDA2*D2)+Z2*SINH(LANDA2*D2))/
-(Z2*CASH(LANDA2*D2)+SINH(LANDA2*D2))
Z1=LANDA1*MIU2/(LANDA1*MIU1*CP2)
CP1=(CASH(LANDA1*D1)+Z1*SINH(LANDA1*D1))/
-(Z1*CASH(LANDA1*D1)+SINH(LANDA1*D1))
CP=CP1*LANDA1*MIU0/(MIU1*LANDA1)
SUM=SUM+(LANDA*SYN(N*PI/2)+COS(I*PI*B/(2*TAU)))/((I**2)*N*(SIN
*ND*A*D)+CP*COSH(LANDA*D))
30 CONTINUE
20 CONTINUE
MODSUM=CABS(SUM)
BZERO=(PI**3)*(TAU-B)/(MIU0+TAU*32.*MODSUM)
SOL=(0.6+(KAPA-1.)/10)*BZERO
DO 21 I3=1,17,2
DO 31 I4=1,17,2
I=I3
N=I4
LANDA=SQRT((I*PI/TAU)**2+(N*PI/(2*A))**2)
LANDA1=CSQRT(LANDA**2+C8*STGFF*MIU1*V*I*PI/TAU)
LANDA2=CSQRT(LANDA**2+C8*STGFF*MIU2*V*I*PI/TAU)
LANDA3=CSQRT(LANDA**2+C8*STGFF*MIU3*V*I*PI/TAU)
LANDA4=CSQRT(LANDA**2+C8*STGFF*MIU4*V*I*PI/TAU)
Z3=LANDA3*MIU4/(LANDA3*MIU3)
CP3=(CASH(LANDA3*D3)+Z3*SINH(LANDA3*D3))/
-(Z3*CASH(LANDA3*D3)+SINH(LANDA3*D3))
Z2=LANDA2*MIU3/(LANDA2*MIU2*CP3)
CP2=(CASH(LANDA2*D2)+Z2*SINH(LANDA2*D2))/
-(Z2*CASH(LANDA2*D2)+SINH(LANDA2*D2))
Z1=LANDA1*MIU2/(LANDA1*MIU1*CP2)
CP1=(CASH(LANDA1*D1)+Z1*SINH(LANDA1*D1))/
-(Z1*CASH(LANDA1*D1)+SINH(LANDA1*D1))
CP=CP1*LANDA1*MIU0/(MIU1*LANDA1)
CO=C8*MIU0*32*SOL*SIN(I*PI/2)*SIN(N*PI/2)+COS(I*PI*B/(2*TAU))
**2)*I*N*(TAU-B)-LANDA*(SINH(LANDA*D)+CP*COSH(LANDA*D))
E1=CO
C2=C1*(CASH(LANDA1*D1)-CP1*SINH(LANDA1*D1))
C3=C2*(CASH(LANDA2*D2)-CP2*SINH(LANDA2*D2))
C4=C3*(CASH(LANDA3*D3)-CP3*SINH(LANDA3*D3))
H1=CABS(C1*LANDA1*CP1)/MIU1
PR0G6 29/05/76 08.53.37

```

```

H2=CABS(C2*LANDA2*CP2)/MIU2
H3=CABS(C3*LANDA3*CP3)/MIU3
H4=CABS(C4*LANDA4)/MIU4
HP1=SQRT(HP1**2+H1**2)
HP2=SQRT(HP2**2+H2**2)
HP3=SQRT(HP3**2+H3**2)
HP4=SQRT(HP4**2+H4**2)
31 CONTINUE
21 CONTINUE
DO 60 KK=1,40
IF(HP1.GE.0.0.AND.HP1.LE.42.0) MIUK1=950.+MIU0
IF(HP2.GE.0.0.AND.HP2.LE.42.0) MIUK2=950.+MIU0
IF(HP3.GE.0.0.AND.HP3.LE.42.0) MIUK3=950.+MIU0
IF(HP4.GE.0.0.AND.HP4.LE.42.0) MIUK4=950.+MIU0
15/((H(KK+1)-H(KK))/HP1) MIUK1=(0.05*KK+(HP1-H(KK))
15/((H(KK+1)-H(KK))/HP2) MIUK2=(0.05*KK+(HP2-H(KK))
15/((H(KK+1)-H(KK))/HP3) MIUK3=(0.05*KK+(HP3-H(KK))
15/((H(KK+1)-H(KK))/HP4) MIUK4=(0.05*KK+(HP4-H(KK))
IF(HP1.GE.6000) MIUK1=(0.05*HP1+5250.)/(HP1+3000)
IF(HP2.GE.6000) MIUK2=(0.05*HP2+5250.)/(HP2+3000)
IF(HP3.GE.6000) MIUK3=(0.05*HP3+5250.)/(HP3+3000)
IF(HP4.GE.6000) MIUK4=(0.05*HP4+5250.)/(HP4+3000)
60 CONTINUE
1 IF(ABS((MIUK1-MIU1)/MIU1).LE.0.100.AND.
1 ABS((MIUK2-MIU2)/MIU2).IF.0.100.AND.
1 ABS((MIUK3-MIU3)/MIU3).IF.0.100.AND.
1 ABS((MIUK4-MIU4)/MIU4).IF.0.100) GO TO 81
BATA=0.9
MIU1=MIU1+BATA*(MIUK1-MIU1)
MIU2=MIU2+BATA*(MIUK2-MIU2)
MIU3=MIU3+BATA*(MIUK3-MIU3)
MIU4=MIU4+BATA*(MIUK4-MIU4)
UBI+1
IF(U.GT.50.0) GO TO 84

```

```

99  FORMAT(1X,'M1=' ,F10.4,'M2=' ,F10.4,'M3=' ,F10.4,'M4=' ,F10.4,4E10.
HC=2*SOL/(100*KI+(TAU-1))
KJ=HC/2
MIZ=HC*(TAU-E)*(1-KU)+2*P*GIZ*(2*A+TAU)
MCU=HC*(TAU-B)*KJ+2*P*GCU*(2*A+TAU)
MFE=(B*HC*(2*P+1)+HJ*(2*P*TAU+B))*2*A*GFE
MASA=MFE+MCU+MIZ

```

-184-

PROG6 29/05/76 08.53:37

```

FORTA=0.0
DO 22 I5=1.17,2
DO 22 I6=1.17,2
I=I5
K=I6
LANDA=SQRT((I*PI/TAU)**2+(N*PI/(2*A))**2)
LANDA1=CSORT(LANDA**2+CR*STGFF*MI11+V*I*PI/TAU)
LANDA2=CSORT(LANDA**2+CR*STGFF*MI12+V*I*PI/TAU)
LANDA3=CSORT(LANDA**2+CR*STGFF*MI13+V*I*PI/TAU)
LANDA4=CSORT(LANDA**2+CR*STGFF*MI14+V*I*PI/TAU)
LANDR1=REAL(LANDA1)
LANDR2=REAL(LANDA2)
LANDR3=REAL(LANDA3)
LANDR4=REAL(LANDA4)
LANDI1=AIMAG(LANDA1)
LANDI2=AIMAG(LANDA2)
LANDI3=AIMAG(LANDA3)
LANDI4=AIMAG(LANDA4)
Z3=(LANDA3*MIU4)/(LANDA4*MIU3)
CP3=(CASH(LANDA3*D3)+Z3*SANH(LANDA3*D3))/
-(Z3*CASH(LANDA3*D3)+SANH(LANDA3*D3))
Z2=(LANDA2*MIU7)/(LANDA3*MIU2*CP3)
CP2=(CASH(LANDA2*D2)+Z2*SANH(LANDA2*D2))/
-(Z2*CASH(LANDA2*D2)+SANH(LANDA2*D2))
Z1=(LANDA1*MIU7)/(LANDA2*MIU1*CP2)
CP1=(CASH(LANDA1*D1)+Z1*SANH(LANDA1*D1))/
-(Z1*CASH(LANDA1*D1)+SANH(LANDA1*D1))
CP=C8*MIUO*32*SOL*SIN(I*PI/2)*SIN(N*PI/2)*COS(I*PI+B/(2*TAU))/(
*(2)*I*A*(TAU-B)*LANDA*(SINH(LANDA*D)+CP*COSH(LANDA*D))
C1=C0
C2=C1*(CASH(LANDA1*D1)-CP1*SANH(LANDA1*D1))
C3=C2*(CASH(LANDA2*D2)-CP2*SANH(LANDA2*D2))
C4=C3*(CASH(LANDA3*D3)-CP3*SANH(LANDA3*D3))
CONC1=CONJG(C1)
CONC2=CONJG(C2)
CONC3=CONJG(C3)
CONC4=CONJG(C4)
CONCP=CONJG(CP)
CONCP1=CONJG(CP1)
CONCP2=CONJG(CP2)
CONCP3=CONJG(CP3)
CONCP4=1
M1=2*P*TAU*A*SIGFE+V*(CABS(C1)**2)*(LANDA**2)
M2=2*P*TAU*A*SIGFE+V*(CABS(C2)**2)*(LANDA**2)
M3=2*P*TAU*A*SIGFE+V*(CABS(C3)**2)*(LANDA**2)
M4=2*P*TAU*A*SIGFE+V*(CABS(C4)**2)*(LANDA**2)

```

PROG6 29/05/76 08.53:37

```

P1=M1*(SIN(2*LANDI1*D1)*(CP1-CONCP1-1)/(4*LANDI1)-SINH(2*LANDR1)
1)*((CP1-CONCP1+1)/(4*LANDR1)+(COS(2*LANDI1*D1)-1)*AIMAG(CP1)/(2*
1DI1)+(COSH(2*LANDR1*D1)-1)*REAL(CP1)/(2*LANDR1))
P2=M2*(SIN(2*LANDI2*D2)*(CP2-CONCP2-1)/(4*LANDI2)-SINH(2*LANDR2)
-1)*((CP2-CONCP2+1)/(4*LANDR2)+(COS(2*LANDI2*D2)-1)*AIMAG(CP2)/(2*
1DI2)+(COSH(2*LANDR2*D2)-1)*REAL(CP2)/(2*LANDR2))
P3=M3*(SIN(2*LANDI3*D3)*(CP3-CONCP3-1)/(4*LANDI3)-SINH(2*LANDR3)
1)*((CP3-CONCP3+1)/(4*LANDR3)+(COS(2*LANDI3*D3)-1)*AIMAG(CP3)/(2*
1DI3)+(COSH(2*LANDR3*D3)-1)*REAL(CP3)/(2*LANDR3))
P4=M4/(2*LANDR4)
P5=CABS(P4)
P6=CABS(P2)
P7=CABS(P3)
PH=P4
22 CONTINUE
BETA=FORTA/MASA
ALFA=FORTA/V*(BZERO+(ROCU+4*(2*A+TAU)*(0.6+(KAPA-1)/10.)*P
*U))
WRITE(108,103) FORTA,V,SOL
103 FORMAT(16X,'FORTA=',E10.4,'VITEZA=',E10.4,'SOLENTIE=',E10.4)
WRITE(109,101) TAU,B,A
101 FORMAT(16X,'GEOMETRIA MASINI TAU=',E10.4,'B.DIETE=',E10.4,
'E10.4//)
102 FORMAT(16X,'OPTIM=',E10.4,'OPTIM2=',E10.4//)
62 CONTINUE
STOP
END

```

PROG6 29/05/76 08.54:33

OPTIM= .1313E+03OPTIM2= .6948E+02

M1= .2077E-04M2= .2943E-04M3= .1637E-03M4= .1192E-02 .1040E+05 .8000E+01
FOR1A= .1052E+04VITEZA= .1000E+03SOLEFNATIE= .1040E+05

GEOMETRIA MASINII TAU= .4000E-01B.DINTE= .1800E-01A= .3200E-01

OPTIM= .1571E+03OPTIM2= .7528E+02

M1= .2433E-04M2= .3823E-04M3= .2488E-03M4= .1192E-02 .7510E+04 .8000E+01
FOR1A= .5470E+03VITEZA= .1000E+03SOLEFNATIE= .7510E+04

GEOMETRIA MASINII TAU= .6000E-01B.DINTE= .1800E-01A= .3200E-01

OPTIM= .9447E+02OPTIM2= .6372E+02

M1= .2277E-04M2= .3289E-04M3= .1527E-03M4= .1192E-02 .9015E+04 .8000E+01
FOR1A= .8324E+03VITEZA= .1000E+03SOLEFNATIE= .9015E+04

GEOMETRIA MASINII TAU= .6000E-01B.DINTE= .2100E-01A= .3200E-01

OPTIM= .1203E+03OPTIM2= .7692E+02

M1= .2168E-04M2= .2951E-04M3= .1161E-03M4= .1192E-02 .1057E+05 .7000E+01
FOR1A= .1205E+04VITEZA= .1000E+03SOLEFNATIE= .1057E+05

GEOMETRIA MASINII TAU= .6000E-01B.DINTE= .2400E-01A= .3200E-01

OPTIM= .1405E+03OPTIM2= .8717E+02

M1= .2087E-04M2= .2714E-04M3= .8734E-04M4= .1190E-02 .1216E+05 .7000E+01
FOR1A= .1678E+04VITEZA= .1000E+03SOLEFNATIE= .1216E+05

GEOMETRIA MASINII TAU= .6000E-01B.DINTE= .2700E-01A= .3200E-01

OPTIM= .1796E+03OPTIM2= .9614E+02

M1= .2576E-04M2= .3947E-04M3= .1984E-03M4= .1192E-02 .7874E+04 .8000E+01
FOR1A= .6336E+03VITEZA= .1000E+03SOLEFNATIE= .7874E+04

GEOMETRIA MASINII TAU= .8000E-01B.DINTE= .2400E-01A= .3200E-01

OPTIM= .9046E+02OPTIM2= .6711E+02

M1= .2383E-04M2= .3375E-04M3= .1358E-03M4= .1191E-02 .9534E+04 .7000E+01
FOR1A= .9793E+03VITEZA= .1000E+03SOLEFNATIE= .9534E+04

GEOMETRIA MASINII TAU= .8000E-01B.DINTE= .2800E-01A= .3200E-01

OPTIM= .1102E+03OPTIM2= .7954E+02

M1= .2248E-04M2= .3003E-04M3= .9510E-04M4= .1191E-02 .1124E+05 .7000E+01
FOR1A= .1434E+04VITEZA= .1000E+03SOLEFNATIE= .1124E+05

GEOMETRIA MASINII TAU= .8000E-01B.DINTE= .3200E-01A= .3200E-01

044 ITHIA4 AN = PU50 PH = 0001 DATE = 14/05/76 - 191 -
 LDEB = 03H 33M 20S H.FIN = 03H 33M 58S IPTVT = 00001785
 GP = 00018 MEM = 00011 LO = IN = OUT = 00000
 T = 02

0

L EDITION DE LIENS

044 ITHIA4 AN = PU50 PH = 0002 DATE = 14/05/76
 LDEB = 03H 33M 59S H.FIN = 03H 34M 42S IPTVT = 00001023
 GP = 00018 MEM = 00011 LO = IN = OUT = 00000
 T = 02

D:0.C.NL:4000.TIME:10

- CIMP= .4560E+05 INDUCTIE= .2540E+01 CURENT= .6229E+03 FORTA= .6775E+05 VITEZA=
- U.INDUS= .2827E+03 .6626E+03 U.BORNE= .5941E+03 .1192E+04 RAJD= .9927E-73 FAC.
 CIMP= .5220E+05 INDUCTIE= .2440E+01 CURENT= .4905E+03 FORTA= .4007E+05 VITEZA=
- U.INDUS= .2125E+03 .5575E+03 U.BORNE= .4576E+03 .9742E+03 RAJD= .0000E+00 FAC.
 CIMP= .2640E+05 INDUCTIE= .2340E+01 CURENT= .4385E+03 FORTA= .3098E+05 VITEZA=
- U.INDUS= .1837E+03 .5153E+03 U.BORNE= .4029E+03 .8878E+03 RAJD= .0000E+00 FAC.
 CIMP= .1740E+05 INDUCTIE= .2280E+01 CURENT= .3076E+03 FORTA= .1421E+05 VITEZA=
- U.INDUS= .1201E+03 .3842E+03 U.BORNE= .2739E+03 .6457E+03 RAJD= .0000E+00 FAC.
 CIMP= .1120E+05 INDUCTIE= .2190E+01 CURENT= .2109E+03 FORTA= .6118E+04 VITEZA=
- U.INDUS= .7541E+02 .2776E+03 U.BORNE= .1809E+03 .4569E+03 RAJD= .0000E+00 FAC.
 CIMP= .8200E+04 INDUCTIE= .2160E+01 CURENT= .1632E+03 FORTA= .3387E+04 VITEZA=
- U.INDUS= .5395E+02 .2224E+03 U.BORNE= .1356E+03 .3611E+03 RAJD= .0000E+00 FAC.
 CIMP= .7400E+04 INDUCTIE= .2090E+01 CURENT= .1437E+03 FORTA= .2030E+04 VITEZA=
- U.INDUS= .4966E+02 .2111E+03 U.BORNE= .1265E+03 .3417E+03 RAJD= .0000E+00 FAC.
 CIMP= .6600E+04 INDUCTIE= .2040E+01 CURENT= .1434E+03 FORTA= .2678E+04 VITEZA=
- U.INDUS= .4491E+02 .1990E+03 U.BORNE= .1166E+03 .3209E+03 RAJD= .0000E+00 FAC.
 CIMP= .6500E+04 INDUCTIE= .2010E+01 CURENT= .1472E+03 FORTA= .2591E+04 VITEZA=
- U.INDUS= .4576E+02 .2045E+03 U.BORNE= .1194E+03 .3296E+03 RAJD= .0000E+00 FAC.
 CIMP= .6000E+04 INDUCTIE= .1990E+01 CURENT= .1409E+03 FORTA= .2304E+04 VITEZA=
- U.INDUS= .4268E+02 .1963E+03 U.BORNE= .1129E+03 .3156E+03 RAJD= .0000E+00 FAC.
 CIMP= .5400E+04 INDUCTIE= .1940E+01 CURENT= .1306E+03 FORTA= .1041E+04 VITEZA=
- U.INDUS= .3857E+02 .1847E+03 U.BORNE= .1040E+03 .2959E+03 RAJD= .0000E+00 FAC.
 CIMP= .5200E+04 INDUCTIE= .1920E+01 CURENT= .1302E+03 FORTA= .1002E+04 VITEZA=
- U.INDUS= .3799E+02 .1842E+03 U.BORNE= .1031E+03 .2948E+03 RAJD= .0000E+00 FAC.
 CIMP= .4500E+04 INDUCTIE= .1840E+01 CURENT= .1157E+03 FORTA= .1449E+04 VITEZA=
- U.INDUS= .3259E+02 .1652E+03 U.BORNE= .9041E+02 .2655E+03 RAJD= .0000E+00 FAC.
 CIMP= .3800E+04 INDUCTIE= .1800E+01 CURENT= .1009E+03 FORTA= .1049E+04 VITEZA=
- U.INDUS= .2713E+02 .1451E+03 U.BORNE= .7739E+02 .2506E+03 RAJD= .0000E+00 FAC.
 CIMP= .3200E+04 INDUCTIE= .1790E+01 CURENT= .8600E+02 FORTA= .17450E+03 VITEZA=
- U.INDUS= .2227E+02 .1271E+03 U.BORNE= .6576E+02 .2010E+03 RAJD= .0000E+00 FAC.
 CIMP= .2800E+04 INDUCTIE= .1740E+01 CURENT= .7781E+02 FORTA= .5736E+03 VITEZA=
- U.INDUS= .1917E+02 .1146E+03 U.BORNE= .5807E+02 .1807E+03 RAJD= .0000E+00 FAC.
 CIMP= .2500E+04 INDUCTIE= .1640E+01 CURENT= .7312E+02 FORTA= .4056E+03 VITEZA=
- U.INDUS= .1762E+02 .1081E+03 U.BORNE= .5418E+02 .1702E+03 RAJD= .0000E+00 FAC.
 CIMP= .2400E+04 INDUCTIE= .1600E+01 CURENT= .6996E+02 FORTA= .4518E+03 VITEZA=

IP= .2900E+04 INDUCTIE= .7500E+01 CURRENT= .6374E+02 FORTA= 3.647E+03 VITEZA= ?
- 192 -

INDUS= .1487E+02 .9475E+02 U.BORNE= .4675E+02 .1489E+03 RAND= .0000E+00 FAC.P
MP= .1900E+04 INDUCTIE= .1460E+01 CURRENT= .5910E+02 FORTA= 3.058E+03 VITEZA= ?

INDUS= .1344E+02 .8835E+02 U.BORNE= .4302E+02 .1386E+03 RAND= .0000E+00 FAC.P

4 LIAIA4 AN = PUSC PH = 0003 DATE = 14/05/76
EB = 03M 34M 42S H.FIN = 03M 34M 49S IPTVT = 00000252
= 00015 MEM = 00010 LO = IN = OUT = 00000
= 02

H X

CALCULUL MASINILOR LINIARE UNILATERALE CU INDUS AL-FE
PROGRAM GENERAL DE CALCUL A FORTELOR DE TRACTIUNE SI A
FORTELOR NORMALE

```

REAL KA, K2, NM, NC, HON, HOU, HOLO, HOP, HOPA, NA, NI, NU, KS, NI, NIA, NO,
141 HIL, HIO, HIP, HIN, HIC, HIS, KR, INDVO, ACCAN
142 CG, Y, GAMMA1, CSRT, CMPLX, SCAM, GA, GN, JMC, CAP, ZAL, ZI, CTAN
143 LE, C, CMYU, ANR, CRYP, ANG1, CSGAN, ACSA, LANG1, SANC1, CH, ZR
144 KX, KY, KZ, KX1, KY1, KZ1, KX2, KY2, KZ2, KX3, KY3, KZ3, KX4, KY4, KZ4
145 KX5, KY5, KZ5, KX6, KY6, KZ6, KX7, KY7, KZ7, KX8, KY8, KZ8, KX9, KY9, KZ9
146 KX10, KY10, KZ10, KX11, KY11, KZ11, KX12, KY12, KZ12, KX13, KY13, KZ13
147 KX14, KY14, KZ14, KX15, KY15, KZ15, KX16, KY16, KZ16, KX17, KY17, KZ17
148 KX18, KY18, KZ18, KX19, KY19, KZ19, KX20, KY20, KZ20, KX21, KY21, KZ21
149 KX22, KY22, KZ22, KX23, KY23, KZ23, KX24, KY24, KZ24, KX25, KY25, KZ25
150 KX26, KY26, KZ26, KX27, KY27, KZ27, KX28, KY28, KZ28, KX29, KY29, KZ29
151 KX30, KY30, KZ30, KX31, KY31, KZ31, KX32, KY32, KZ32, KX33, KY33, KZ33
152 KX34, KY34, KZ34, KX35, KY35, KZ35, KX36, KY36, KZ36, KX37, KY37, KZ37
153 KX38, KY38, KZ38, KX39, KY39, KZ39, KX40, KY40, KZ40, KX41, KY41, KZ41
154 KX42, KY42, KZ42, KX43, KY43, KZ43, KX44, KY44, KZ44, KX45, KY45, KZ45
155 KX46, KY46, KZ46, KX47, KY47, KZ47, KX48, KY48, KZ48, KX49, KY49, KZ49
156 KX50, KY50, KZ50, KX51, KY51, KZ51, KX52, KY52, KZ52, KX53, KY53, KZ53
157 KX54, KY54, KZ54, KX55, KY55, KZ55, KX56, KY56, KZ56, KX57, KY57, KZ57
158 KX58, KY58, KZ58, KX59, KY59, KZ59, KX60, KY60, KZ60, KX61, KY61, KZ61
159 KX62, KY62, KZ62, KX63, KY63, KZ63, KX64, KY64, KZ64, KX65, KY65, KZ65
160 KX66, KY66, KZ66, KX67, KY67, KZ67, KX68, KY68, KZ68, KX69, KY69, KZ69
161 KX70, KY70, KZ70, KX71, KY71, KZ71, KX72, KY72, KZ72, KX73, KY73, KZ73
162 KX74, KY74, KZ74, KX75, KY75, KZ75, KX76, KY76, KZ76, KX77, KY77, KZ77
163 KX78, KY78, KZ78, KX79, KY79, KZ79, KX80, KY80, KZ80, KX81, KY81, KZ81
164 KX82, KY82, KZ82, KX83, KY83, KZ83, KX84, KY84, KZ84, KX85, KY85, KZ85
165 KX86, KY86, KZ86, KX87, KY87, KZ87, KX88, KY88, KZ88, KX89, KY89, KZ89
166 KX90, KY90, KZ90, KX91, KY91, KZ91, KX92, KY92, KZ92, KX93, KY93, KZ93
167 KX94, KY94, KZ94, KX95, KY95, KZ95, KX96, KY96, KZ96, KX97, KY97, KZ97
168 KX98, KY98, KZ98, KX99, KY99, KZ99, KX100, KY100, KZ100
169 KX101, KY101, KZ101, KX102, KY102, KZ102, KX103, KY103, KZ103
170 KX104, KY104, KZ104, KX105, KY105, KZ105, KX106, KY106, KZ106
171 KX107, KY107, KZ107, KX108, KY108, KZ108, KX109, KY109, KZ109
172 KX110, KY110, KZ110, KX111, KY111, KZ111, KX112, KY112, KZ112
173 KX113, KY113, KZ113, KX114, KY114, KZ114, KX115, KY115, KZ115
174 KX116, KY116, KZ116, KX117, KY117, KZ117, KX118, KY118, KZ118
175 KX119, KY119, KZ119, KX120, KY120, KZ120, KX121, KY121, KZ121
176 KX122, KY122, KZ122, KX123, KY123, KZ123, KX124, KY124, KZ124
177 KX125, KY125, KZ125, KX126, KY126, KZ126, KX127, KY127, KZ127
178 KX128, KY128, KZ128, KX129, KY129, KZ129, KX130, KY130, KZ130
179 KX131, KY131, KZ131, KX132, KY132, KZ132, KX133, KY133, KZ133
180 KX134, KY134, KZ134, KX135, KY135, KZ135, KX136, KY136, KZ136
181 KX137, KY137, KZ137, KX138, KY138, KZ138, KX139, KY139, KZ139
182 KX140, KY140, KZ140, KX141, KY141, KZ141, KX142, KY142, KZ142
183 KX143, KY143, KZ143, KX144, KY144, KZ144, KX145, KY145, KZ145
184 KX146, KY146, KZ146, KX147, KY147, KZ147, KX148, KY148, KZ148
185 KX149, KY149, KZ149, KX150, KY150, KZ150, KX151, KY151, KZ151
186 KX152, KY152, KZ152, KX153, KY153, KZ153, KX154, KY154, KZ154
187 KX155, KY155, KZ155, KX156, KY156, KZ156, KX157, KY157, KZ157
188 KX158, KY158, KZ158, KX159, KY159, KZ159, KX160, KY160, KZ160
189 KX161, KY161, KZ161, KX162, KY162, KZ162, KX163, KY163, KZ163
190 KX164, KY164, KZ164, KX165, KY165, KZ165, KX166, KY166, KZ166
191 KX167, KY167, KZ167, KX168, KY168, KZ168, KX169, KY169, KZ169
192 KX170, KY170, KZ170, KX171, KY171, KZ171, KX172, KY172, KZ172
193 KX173, KY173, KZ173, KX174, KY174, KZ174, KX175, KY175, KZ175
194 KX176, KY176, KZ176, KX177, KY177, KZ177, KX178, KY178, KZ178
195 KX179, KY179, KZ179, KX180, KY180, KZ180, KX181, KY181, KZ181
196 KX182, KY182, KZ182, KX183, KY183, KZ183, KX184, KY184, KZ184
197 KX185, KY185, KZ185, KX186, KY186, KZ186, KX187, KY187, KZ187
198 KX188, KY188, KZ188, KX189, KY189, KZ189, KX190, KY190, KZ190
199 KX191, KY191, KZ191, KX192, KY192, KZ192, KX193, KY193, KZ193
200 KX194, KY194, KZ194, KX195, KY195, KZ195, KX196, KY196, KZ196
201 KX197, KY197, KZ197, KX198, KY198, KZ198, KX199, KY199, KZ199
202 KX200, KY200, KZ200, KX201, KY201, KZ201, KX202, KY202, KZ202
203 KX203, KY203, KZ203, KX204, KY204, KZ204, KX205, KY205, KZ205
204 KX206, KY206, KZ206, KX207, KY207, KZ207, KX208, KY208, KZ208
205 KX209, KY209, KZ209, KX210, KY210, KZ210, KX211, KY211, KZ211
206 KX212, KY212, KZ212, KX213, KY213, KZ213, KX214, KY214, KZ214
207 KX215, KY215, KZ215, KX216, KY216, KZ216, KX217, KY217, KZ217
208 KX218, KY218, KZ218, KX219, KY219, KZ219, KX220, KY220, KZ220
209 KX221, KY221, KZ221, KX222, KY222, KZ222, KX223, KY223, KZ223
210 KX224, KY224, KZ224, KX225, KY225, KZ225, KX226, KY226, KZ226
211 KX227, KY227, KZ227, KX228, KY228, KZ228, KX229, KY229, KZ229
212 KX230, KY230, KZ230, KX231, KY231, KZ231, KX232, KY232, KZ232
213 KX233, KY233, KZ233, KX234, KY234, KZ234, KX235, KY235, KZ235
214 KX236, KY236, KZ236, KX237, KY237, KZ237, KX238, KY238, KZ238
215 KX239, KY239, KZ239, KX240, KY240, KZ240, KX241, KY241, KZ241
216 KX242, KY242, KZ242, KX243, KY243, KZ243, KX244, KY244, KZ244
217 KX245, KY245, KZ245, KX246, KY246, KZ246, KX247, KY247, KZ247
218 KX248, KY248, KZ248, KX249, KY249, KZ249, KX250, KY250, KZ250
219 KX251, KY251, KZ251, KX252, KY252, KZ252, KX253, KY253, KZ253
220 KX254, KY254, KZ254, KX255, KY255, KZ255, KX256, KY256, KZ256
221 KX257, KY257, KZ257, KX258, KY258, KZ258, KX259, KY259, KZ259
222 KX260, KY260, KZ260, KX261, KY261, KZ261, KX262, KY262, KZ262
223 KX263, KY263, KZ263, KX264, KY264, KZ264, KX265, KY265, KZ265
224 KX266, KY266, KZ266, KX267, KY267, KZ267, KX268, KY268, KZ268
225 KX269, KY269, KZ269, KX270, KY270, KZ270, KX271, KY271, KZ271
226 KX272, KY272, KZ272, KX273, KY273, KZ273, KX274, KY274, KZ274
227 KX275, KY275, KZ275, KX276, KY276, KZ276, KX277, KY277, KZ277
228 KX278, KY278, KZ278, KX279, KY279, KZ279, KX280, KY280, KZ280
229 KX281, KY281, KZ281, KX282, KY282, KZ282, KX283, KY283, KZ283
230 KX284, KY284, KZ284, KX285, KY285, KZ285, KX286, KY286, KZ286
231 KX287, KY287, KZ287, KX288, KY288, KZ288, KX289, KY289, KZ289
232 KX290, KY290, KZ290, KX291, KY291, KZ291, KX292, KY292, KZ292
233 KX293, KY293, KZ293, KX294, KY294, KZ294, KX295, KY295, KZ295
234 KX296, KY296, KZ296, KX297, KY297, KZ297, KX298, KY298, KZ298
235 KX299, KY299, KZ299, KX300, KY300, KZ300, KX301, KY301, KZ301
236 KX302, KY302, KZ302, KX303, KY303, KZ303, KX304, KY304, KZ304
237 KX305, KY305, KZ305, KX306, KY306, KZ306, KX307, KY307, KZ307
238 KX308, KY308, KZ308, KX309, KY309, KZ309, KX310, KY310, KZ310
239 KX311, KY311, KZ311, KX312, KY312, KZ312, KX313, KY313, KZ313
240 KX314, KY314, KZ314, KX315, KY315, KZ315, KX316, KY316, KZ316
241 KX317, KY317, KZ317, KX318, KY318, KZ318, KX319, KY319, KZ319
242 KX320, KY320, KZ320, KX321, KY321, KZ321, KX322, KY322, KZ322
243 KX323, KY323, KZ323, KX324, KY324, KZ324, KX325, KY325, KZ325
244 KX326, KY326, KZ326, KX327, KY327, KZ327, KX328, KY328, KZ328
245 KX329, KY329, KZ329, KX330, KY330, KZ330, KX331, KY331, KZ331
246 KX332, KY332, KZ332, KX333, KY333, KZ333, KX334, KY334, KZ334
247 KX335, KY335, KZ335, KX336, KY336, KZ336, KX337, KY337, KZ337
248 KX338, KY338, KZ338, KX339, KY339, KZ339, KX340, KY340, KZ340
249 KX341, KY341, KZ341, KX342, KY342, KZ342, KX343, KY343, KZ343
250 KX344, KY344, KZ344, KX345, KY345, KZ345, KX346, KY346, KZ346
251 KX347, KY347, KZ347, KX348, KY348, KZ348, KX349, KY349, KZ349
252 KX350, KY350, KZ350, KX351, KY351, KZ351, KX352, KY352, KZ352
253 KX353, KY353, KZ353, KX354, KY354, KZ354, KX355, KY355, KZ355
254 KX356, KY356, KZ356, KX357, KY357, KZ357, KX358, KY358, KZ358
255 KX359, KY359, KZ359, KX360, KY360, KZ360, KX361, KY361, KZ361
256 KX362, KY362, KZ362, KX363, KY363, KZ363, KX364, KY364, KZ364
257 KX365, KY365, KZ365, KX366, KY366, KZ366, KX367, KY367, KZ367
258 KX368, KY368, KZ368, KX369, KY369, KZ369, KX370, KY370, KZ370
259 KX371, KY371, KZ371, KX372, KY372, KZ372, KX373, KY373, KZ373
260 KX374, KY374, KZ374, KX375, KY375, KZ375, KX376, KY376, KZ376
261 KX377, KY377, KZ377, KX378, KY378, KZ378, KX379, KY379, KZ379
262 KX380, KY380, KZ380, KX381, KY381, KZ381, KX382, KY382, KZ382
263 KX383, KY383, KZ383, KX384, KY384, KZ384, KX385, KY385, KZ385
264 KX386, KY386, KZ386, KX387, KY387, KZ387, KX388, KY388, KZ388
265 KX389, KY389, KZ389, KX390, KY390, KZ390, KX391, KY391, KZ391
266 KX392, KY392, KZ392, KX393, KY393, KZ393, KX394, KY394, KZ394
267 KX395, KY395, KZ395, KX396, KY396, KZ396, KX397, KY397, KZ397
268 KX398, KY398, KZ398, KX399, KY399, KZ399, KX400, KY400, KZ400
269 KX401, KY401, KZ401, KX402, KY402, KZ402, KX403, KY403, KZ403
270 KX404, KY404, KZ404, KX405, KY405, KZ405, KX406, KY406, KZ406
271 KX407, KY407, KZ407, KX408, KY408, KZ408, KX409, KY409, KZ409
272 KX410, KY410, KZ410, KX411, KY411, KZ411, KX412, KY412, KZ412
273 KX413, KY413, KZ413, KX414, KY414, KZ414, KX415, KY415, KZ415
274 KX416, KY416, KZ416, KX417, KY417, KZ417, KX418, KY418, KZ418
275 KX419, KY419, KZ419, KX420, KY420, KZ420, KX421, KY421, KZ421
276 KX422, KY422, KZ422, KX423, KY423, KZ423, KX424, KY424, KZ424
277 KX425, KY425, KZ425, KX426, KY426, KZ426, KX427, KY427, KZ427
278 KX428, KY428, KZ428, KX429, KY429, KZ429, KX430, KY430, KZ430
279 KX431, KY431, KZ431, KX432, KY432, KZ432, KX433, KY433, KZ433
280 KX434, KY434, KZ434, KX435, KY435, KZ435, KX436, KY436, KZ436
281 KX437, KY437, KZ437, KX438, KY438, KZ438, KX439, KY439, KZ439
282 KX440, KY440, KZ440, KX441, KY441, KZ441, KX442, KY442, KZ442
283 KX443, KY443, KZ443, KX444, KY444, KZ444, KX445, KY445, KZ445
284 KX446, KY446, KZ446, KX447, KY447, KZ447, KX448, KY448, KZ448
285 KX449, KY449, KZ449, KX450, KY450, KZ450, KX451, KY451, KZ451
286 KX452, KY452, KZ452, KX453, KY453, KZ453, KX454, KY454, KZ454
287 KX455, KY455, KZ455, KX456, KY456, KZ456, KX457, KY457, KZ457
288 KX458, KY458, KZ458, KX459, KY459, KZ459, KX460, KY460, KZ460
289 KX461, KY461, KZ461, KX462, KY462, KZ462, KX463, KY463, KZ463
290 KX464, KY464, KZ464, KX465, KY465, KZ465, KX466, KY466, KZ466
291 KX467, KY467, KZ467, KX468, KY468, KZ468, KX469, KY469, KZ469
292 KX470, KY470, KZ470, KX471, KY471, KZ471, KX472, KY472, KZ472
293 KX473, KY473, KZ473, KX474, KY474, KZ474, KX475, KY475, KZ475
294 KX476, KY476, KZ476, KX477, KY477, KZ477, KX478, KY478, KZ478
295 KX479, KY479, KZ479, KX480, KY480, KZ480, KX481, KY481, KZ481
296 KX482, KY482, KZ482, KX483, KY483, KZ483, KX484, KY484, KZ484
297 KX485, KY485, KZ485, KX486, KY486, KZ486, KX487, KY487, KZ487
298 KX488, KY488, KZ488, KX489, KY489, KZ489, KX490, KY490, KZ490
299 KX491, KY491, KZ491, KX492, KY492, KZ492, KX493, KY493, KZ493
300 KX494, KY494, KZ494, KX495, KY495, KZ495, KX496, KY496, KZ496
301 KX497, KY497, KZ497, KX498, KY498, KZ498, KX499, KY499, KZ499
302 KX500, KY500, KZ500, KX501, KY501, KZ501, KX502, KY502, KZ502
303 KX503, KY503, KZ503, KX504, KY504, KZ504, KX505, KY505, KZ505
304 KX506, KY506, KZ506, KX507, KY507, KZ507, KX508, KY508, KZ508
305 KX509, KY509, KZ509, KX510, KY510, KZ510, KX511, KY511, KZ511
306 KX512, KY512, KZ512, KX513, KY513, KZ513, KX514, KY514, KZ514
307 KX515, KY515, KZ515, KX516, KY516, KZ516, KX517, KY517, KZ517
308 KX518, KY518, KZ518, KX519, KY519, KZ519, KX520, KY520, KZ520
309 KX521, KY521, KZ521, KX522, KY522, KZ522, KX523, KY523, KZ523
310 KX524, KY524, KZ524, KX525, KY525, KZ525, KX526, KY526, KZ526
311 KX527, KY527, KZ527, KX528, KY528, KZ528, KX529, KY529, KZ529
312 KX530, KY530, KZ530, KX531, KY531, KZ531, KX532, KY532, KZ532
313 KX533, KY533, KZ533, KX534, KY534, KZ534, KX535, KY535, KZ535
314 KX536, KY536, KZ536, KX537, KY537, KZ537, KX538, KY538, KZ538
315 KX539, KY539, KZ539, KX540, KY540, KZ540, KX541, KY541, KZ541
316 KX542, KY542, KZ542, KX543, KY543, KZ543, KX544, KY544, KZ544
317 KX545, KY545, KZ545, KX546, KY546, KZ546, KX547, KY547, KZ547
318 KX548, KY548, KZ548, KX549, KY549, KZ549, KX550, KY550, KZ550
319 KX551, KY551, KZ551, KX552, KY552, KZ552, KX553, KY553, KZ553
320 KX554, KY554, KZ554, KX555, KY555, KZ555, KX556, KY556, KZ556
321 KX557, KY557, KZ557, KX558, KY558, KZ558, KX559, KY559, KZ559
322 KX560, KY560, KZ560, KX561, KY561, KZ561, KX562, KY562, KZ562
323 KX563, KY563, KZ563, KX564, KY564, KZ564, KX565, KY565, KZ565
324 KX566, KY566, KZ566, KX567, KY567, KZ567, KX568, KY568, KZ568
325 KX569, KY569, KZ569, KX570, KY570, KZ570, KX571, KY571, KZ571
326 KX572, KY572, KZ572, KX573, KY573, KZ573, KX574, KY574, KZ574
327 KX575, KY575, KZ575, KX576, KY576, KZ576, KX577, KY577, KZ577
328 KX578, KY578, KZ578, KX579, KY579, KZ579, KX580, KY580, KZ580
329 KX581, KY581, KZ581, KX582, KY582, KZ582, KX583, KY583, KZ583
330 KX584, KY584, KZ584, KX585, KY585, KZ585, KX586, KY586, KZ586
331 KX587, KY587, KZ587, KX588, KY588, KZ588, KX589, KY589, KZ589
332 KX590, KY590, KZ590, KX591, KY591, KZ591, KX592, KY592, KZ592
333 KX593, KY593, KZ593, KX594, KY594, KZ594, KX595, KY595, KZ595
334 KX596, KY596, KZ596, KX597, KY597, KZ597, KX598, KY598, KZ598
335 KX599, KY599, KZ599, KX600, KY600, KZ600, KX601, KY601, KZ601
336 KX602, KY602, KZ602, KX603, KY603, KZ603, KX604, KY604, KZ604
337 KX605, KY605, KZ605, KX606, KY606, KZ606, KX607, KY607, KZ607
338 KX608, KY608, KZ608, KX609, KY609, KZ609, KX610, KY610, KZ610
339 KX611, KY611, KZ611, KX612, KY612, KZ612, KX613, KY613, KZ613
340 KX614, KY614, KZ614, KX615, KY615, KZ615, KX616, KY616, KZ616
341 KX617, KY617, KZ617, KX618, KY618, KZ618, KX619, KY619, KZ619
342 KX620, KY620, KZ620, KX621, KY621, KZ621, KX622, KY622, KZ622
343 KX623, KY623, KZ623, KX624, KY624, KZ624, KX625, KY625, KZ625
344 KX626, KY626, KZ626, KX627, KY627, KZ627, KX628, KY628, KZ628
345 KX629, KY629, KZ629, KX630, KY630, KZ630, KX631, KY631, KZ631
346 KX632, KY632, KZ632, KX633, KY633, KZ633, KX634, KY634, KZ634
347 KX635, KY635, KZ635, KX636, KY636, KZ636, KX637, KY637, KZ637
348 KX638, KY638, KZ638, KX639, KY639, KZ639, KX640, KY640, KZ640
349 KX641, KY641, KZ641, KX642, KY642, KZ642, KX643, KY643, KZ643
350 KX644, KY644, KZ644, KX645, KY645, KZ645, KX646, KY646, KZ646
351 KX647, KY647, KZ647, KX648, KY648, KZ648, KX649, KY649, KZ649
352 KX650, KY650, KZ650, KX651, KY651, KZ651, KX652, KY652, KZ652
353 KX653, KY653, KZ653, KX654, KY654, KZ654, KX655, KY655, KZ655
354 KX656, KY656, KZ656, KX657, KY657, KZ657, KX658, KY658, KZ658
355 KX659, KY659, KZ659, KX660, KY660, KZ660, KX661, KY661, KZ661
356 KX662, KY662, KZ662, KX663, KY663, KZ663, KX664, KY664, KZ664
357 KX665, KY665, KZ665, KX666, KY666, KZ666, KX667, KY667, KZ667
358 KX668, KY668, KZ668, KX669, KY669, KZ669, KX670, KY670, KZ670
359 KX671, KY671, KZ671, KX672, KY672, KZ672, KX673, KY673, KZ673
360 KX674, KY674, KZ674, KX675, KY675, KZ675, KX676, KY676, KZ676
361 KX677, KY677, KZ677, KX678, KY678, KZ678, KX679, KY679, KZ679
362 KX680, KY680, KZ680, KX681, KY681, KZ681, KX682, KY682, KZ682
363 KX683, KY683, KZ
```



```

42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
POUR INVOQUER
PV=PCU*ABS(F)
POW=(FN.AL+FXIR)*2.0*TAU*F1
PRINPL=3.0*(PCU+21)*R1
EFFEPCU=(1.0-S)/2*(POW+PRINPL)
FN=FN.AL+FXIR+PATTR
FXTOT=FXIP+FXAL
WRITE(100,4) FN.AL, FN.IR, PATTR, FN
4  FORMAT(16Y, 'FN.AL= ', E10.4, 'FN.IR= ', E10.4, 'P.ATTRACTIE= ', E10.4,
FOR TA NORMALE= ', E10.4//')
WRITE(100,5) FXIP, FXAL, FXTOT
3  FORMAT(16Y, 'F. TRACTIUNE FIER= ', E10.4, 'F. TRACTIUNE AL= ', E10.4//1.
1 'F. TRACTIUNE TOTALA= ', E10.4//')
WRITE(100,6) PCU, PV, PF, EFF
6  FORMAT(16Y, 'CURENT= ', E10.4, 'TENSION= ', E6.2// 'POT= ', E10.4,
1 'ORANGEMENT= ', E10.4//')
WRITE(100,7) S, W, TAU, G
7  FORMAT(14X, 'ALUNECARE= ', E10.4, 'SPIRE= ', E10.4, 'PAS POLAR= ', E10.4
1 'INTREFFIER= ', E10.4//')
41 CONTINUE
STOP
END

```

MODULE	PRODATA	TYPE	P	LONGUEUR	1950 (06460)
--------	---------	------	---	----------	--------------

COMPILATOR NELUS HAUT NIVEAU D'ERREUR RENCONTRE = 0) (0.00115
 PROG5 AN = 0002 PH = 0001 DATE = 18/05/76
 INDEX = 094 00Y 33S H.FCM = 09H 01M 16S IPTVI = 00002053
 PLOG = 00018 MEM = 00011 LO = IN = OUT = 00000
 PT = 02 CP = 01

K TED

EDITION DE LIENS.

PROG5 AN = 0002 PH = 0002 DATE = 18/05/76
 INDEX = 09H 01M 16S H.FCM = 09H 02M 02S IPTVI = 00001110
 PLOG = 00018 MEM = 00011 LO = IN = OUT = 00000
 PT = 02 CP = 01

T00

FN.AL= .2808E+04 FN.IR= .1256E+05 F.ATTRACTIE= .1107E+05 FOR TA NORMALE= .429
 F.TRACTIUNE FIER= .13.4E+04 F.TRACTIUNE AL= .7859E+04
 F.TRACTIUNE TOTALA= .1203E+04
 CURENT= .5958E+03 TENSION= .17E+04
 E+ORANGEMENT= .7453E+00
 ALUNECARE= .1000E+00 SPIRE= .1000E+00 PAS POLAR= .5500E+00 INTREFFIER= .1000E-
 FN.AL= .3596E+04 FN.IR= .1472E+05 F.ATTRACTIE= .1339E+05 FOR TA NORMALE= .472

F.TRACTIUNE FIER = .171E+04 F.TRACTIUNE AL = .999E+04
F.TRACTIUNE TOTALA = .1121E+05

CURRENT = .6114E+03 TENSIUNE = .18E+04
VE+GRANDAMENT = .7590E+00

ALUNECAPE = .1000E+00 SPIRE = .1000E+00 PAS POLAR = .3500E+00 INTREFIER = .1000E
FN.AL = .4044E+04 FN.FIER = .1702E+03 F.ATRACIE = .1594E+05 FORTA NORMALA = .51

F.TRACTIUNE FIER = .2114E+04 F.TRACTIUNE AL = .1152E+05
F.TRACTIUNE TOTALA = .1343E+05

CURRENT = .6070E+03 TENSIUNE = .20E+04
VE+GRANDAMENT = .7688E+00

ALUNECAPE = .1000E+00 SPIRE = .1000E+00 PAS POLAR = .3500E+00 INTREFIER = .1000E
FN.AL = .4746E+04 FN.FIER = .1944E+03 F.ATRACIE = .1871E+05 FORTA NORMALA = .54

F.TRACTIUNE FIER = .2575E+04 F.TRACTIUNE AL = .1328E+05
F.TRACTIUNE TOTALA = .1536E+05

CURRENT = .7426E+03 TENSIUNE = .22E+04
VE+GRANDAMENT = .7782E+00

ALUNECAPE = .1000E+00 SPIRE = .1000E+00 PAS POLAR = .3500E+00 INTREFIER = .1000E
FN.AL = .5504E+04 FN.FIER = .2199E+03 F.ATRACIE = .2109E+05 FORTA NORMALA = .57

F.TRACTIUNE FIER = .3090E+04 F.TRACTIUNE AL = .1540E+05
F.TRACTIUNE TOTALA = .1849E+05

CURRENT = .7782E+03 TENSIUNE = .23E+04
VE+GRANDAMENT = .7863E+00

ALUNECAPE = .1000E+00 SPIRE = .1000E+00 PAS POLAR = .3500E+00 INTREFIER = .1000E
FN.AL = .6318E+04 FN.FIER = .2466E+03 F.ATRACIE = .2490E+05 FORTA NORMALA = .60

F.TRACTIUNE FIER = .3660E+04 F.TRACTIUNE AL = .1708E+05
F.TRACTIUNE TOTALA = .2134E+05

CURRENT = .8337E+03 TENSIUNE = .25E+04
VE+GRANDAMENT = .7935E+00

ALUNECAPE = .1000E+00 SPIRE = .1000E+00 PAS POLAR = .3500E+00 INTREFIER = .1000E
FN.AL = .7169E+04 FN.FIER = .2745E+03 F.ATRACIE = .2834E+05 FORTA NORMALA = .63

F. TRACTIUNE TOTALA = .24471E+05

CURRENT = .3093E+03 TENSIUNE = .26E+04

+CORREDAMENT = .7999E+00

ALUNECARE = .1000E+00 SPIRE = .1000E+00 SPAS POLAR = .3500E+00 INTREFIL = .1000E-0

FI. AL = .8115E+04 FI. FIER = .3037E+05 F. ATRACTIE = .3199E+05 FORIA NORMALA = .6405

F. TRACTIUNE FIER = .4971E+04 F. TRACTIUNE AL = .2471E+05

F. TRACTIUNE TOTALA = .2768E+05

CURRENT = .9449E+03 TENSIUNE = .28E+04

+CORREDAMENT = .8055E+00

ALUNECARE = .1000E+00 SPIRE = .1000E+00 SPAS POLAR = .3500E+00 INTREFIER = .1000E-0

005 PROG5 AF = PU02 PH = 0003 DATE = 18/05/76

MIFE = 08H 02M 02S MIFIN = 08H 02M 08S IPTVI = 00000405

LEF = 00018 PEM = 00012 LO = IN = OUT = 00000

MT = 02 CP = 01