

618.185

**UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" DIN TIMIȘOARA
FACULTATEA DE ELECTROTEHNICĂ**

Ing. DORU VĂȚĂU

**CONTRIBUȚII LA PROIECTAREA DISPOZITIVELOR
ELECTROMAGNETICE DE VEHICULARE
A LICHIDELOR ELECTROCONDUCTOARE.
APLICATII LA POMPA MAGNETOHIDRODINAMICĂ DE REPULSIE**

TEZĂ DE DOCTORAT

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

Conducător științific,
Prof. Dr. Ing. ALEXANDRU VASILIEVICI

1 9 9 6

CUPRINS

Cap.1. INTRODUCERE	1
1.1. POMPE MAGNETOHIDRODINAMICE DE REPULSIE	2
1.2. OBIECTIVELE TEZEI	5
1.3. STRUCTURA TEZEI	7
Cap.2. DISPOZITIVE ELECTROMAGNETICE DESTINATE ANTRENĂRII LICHIDELOR ELECTROCONDUCTOARE	10
1.1. DESCRIERE ȘI PRINCIPIU DE FUNCȚIONARE	11
2.2. SOLUȚII CONSTRUCTIVE ȘI TEHNOLOGICE DE DISPOZITIVE ELECTROMAGNETICE DE VEHICULARE A LICHIDELOR ELECTROCONDUCTOARE	16
Cap.3. PROIECTAREA ASISTATĂ DE CALCULATOR A DISPOZITIVELOR ELECTROMAGNETICE DE VEHICULARE A LICHIDELOR ELECTROCONDUCTOARE	19
3.1. CONSIDERAȚII ASUPRA PROIECTĂRII ASISTATE DE CALCULATOR	20
3.2. DATE DE PROIECTARE	22
3.3. DETERMINAREA APROXIMATIVĂ A DISTRIBUȚIEI CĂMPULUI ELECTROMAGNETIC ȘI A VITEZEI LICHIDULUI ELECTROCONDUCTOR ÎN ÎNTREFIERUL DISPOZITIVELOR ELECTROMAGNETICE DE ALE POMPELOR MAGNETO- HIDRODINAMICE DE REPULSIE	26
3.4. ALGORITM ȘI PROGRAM DE PROIECTARE ASISTATĂ DE CALCULATOR A DISPOZITIVELOR ELECTROMAGNETICE DE VEHICULARE A LICHIDELOR ELECTROCONDUCTOARE	41
3.4.1. Determinarea întrefierului δ al circuitului magnetic	41
3.4.2. Calculul dimensiunilor transversale ale miezului feromagnetic	45

3.4.3.	Calculul înălțimii unui miez feromagnetic neramificat și calculul dimensiunilor ferestrei unui miez feromagnetic ramificat . . .	48
3.4.4.	Calculul parametrilor bobinei inductoare	55
3.4.4.1.	Stabilirea numărului de spire al bobinei inductoare	56
3.4.4.2.	Calculul secțiunii și dimensiunilor conductorului bobinei	57
3.4.4.3.	Calculul dimensiunilor înfășurării	58
3.4.4.4.	Calculul rezistenței active a înfășurării	61
3.4.4.5.	Calculul valorii medii maxime a supratemperaturii staționare la care trebuie să funcționeze înfășurarea	62
3.4.4.6.	Determinarea curentului absorbit de bobina inductoare	63
3.4.5.	Calculul puterilor aparentă și activă absorbite de către bobina dispozitivului electromagnetic de vehiculare a lichidelor electroconductive	68
3.4.6.	Calculul randamentului și factorului de putere al dispozitivelor electromagnetice ale pompelor magnetohidrodinamice de repulsie	70
3.4.7.	Calculul unor indicatori de calitate pentru dispozitivul electromagnetic de vehiculare a lichidelor electroconductive	71
3.4.8.	Program de proiectare asistată de calculator a dispozitivelor electromagnetice ale pompelor magnetohidrodinamice de repulsie	74
3.5.	APLICAȚII ȘI CONCLUZII	77

Cap.4. OPTIMIZAREA PROIECTĂRII DISPOZITIVELOR ELECTROMAGNETICE DESTINATE ANTRENĂRII LICHIDELOR ELECTROCONDUCTOARE	82
4.1. GENERALITĂȚI PRIVIND OPTIMIZAREA PROIECTĂRII. METODE DE OPTIMIZARE A PROCESELOR DE PROIECTARE .	83
4.2. FORMULAREA PROBLEMEI DE OPTIMIZARE A DISPOZITIVELOR ELECTROMAGNETICE DE VEHICULARE A LICHIDELOR ELECTROCONDUCTOARE	85
4.3. ALGORITM ȘI PROGRAM DE OPTIMIZARE A PROIECTĂRII DISPOZITIVELOR ELECTROMAGNETICE DE ANTRENARE A LICHIDELOR ELECTROCONDUCTOARE	86
4.4. APLICAȚII ȘI CONCLUZII	89
Cap.5. ANALIZA NUMERICĂ A CÂMPULUI MAGNETIC SI A CÂMPULUI TERMIC AL DISPOZITIVELOR ELECTROMAGNETICE DIN COMPONENȚA POMPELOR MAGNETOHIDRODINAMICE DE REPULSIE	97
5.1. GENERALITĂȚI	98
5.2. ALGORITM GENERAL DE ANALIZĂ NUMERICĂ CU METODA ELEMENTELOR FINITE A CÂMPULUI MAGNETIC INDUCTOR ȘI A CÂMPULUI TERMIC AL DISPOZITIVELOR ELECTROMAGNETICE DE VEHICULARE A LICHIDELOR ELECTROCONDUCTOARE . .	101
5.2.1. Formularea problemei și discretizarea domeniului de analiză	102
5.2.2. Deducerea ecuațiilor elementale	107
5.2.3. Asamblarea ecuațiilor elementale în sistemul general de ecuații (corespunzător structurii)	119
5.2.4. Rezolvarea sistemului general de ecuații	122
5.2.5. Calculul necunoscutelor secundare	123
5.3. PROGRAMELE DE ANALIZĂ NUMERICĂ CU METODA ELEMENTELOR FINITE A CÂMPULUI MAGNETIC ȘI A CÂMPULUI TERMIC AL DISPOZITIVELOR ELECTROMAGNETICE DE VEHICULARE A LICHIDELOR ELECTROCONDUCTOARE	124
5.4. APLICAȚII ȘI CONCLUZII	125

Cap.6. SISTEM DE PROGRAME DE PROIECTARE OPTIMALĂ ȘI ANALIZĂ NUMERICĂ A DISPOZITIVELOR ELECTROMAGNETICE DE VEHICULARE A LICHIDELOR ELECTROCONDUCTOARE (SPPADEM)	130
6.1. Structura și modul de utilizare a SPPADEM . .	131
Cap.7. ÎNCERCĂRI EXPERIMENTALE	138
7.1. Validarea proiectării optimale asistată de calculator a dispozitivelor electromagnetice de vehiculare a lichidelor electroconductoare	139
7.2. Verificarea experimentală a analizei numerice de câmp magnetic și câmp termic la dispozitivele electromagnetice de vehiculare a lichidelor electroconductoare	141
Cap.8. CONCLUZII	145
BIBLIOGRAFIE	149
ANEXE	161
ANEXA 1	162
ANEXA 2A	170
ANEXA 2B	172
ANEXA 3	174
ANEXA 4	177
ANEXA 5	179
ANEXA 6	180
ANEXA 7A	181
ANEXA 7B	186
ANEXA 8	189
ANEXA 9	192
ANEXA 10	195

CAPITOLUL 1

INTRODUCERE

1.1. POMPE MAGNETOHIDRODINAMICE DE REPULSIE

Studiul interacțiunii dintre câmpul electromagnetic și curgerea lichidelor electroconductoare aparține domeniului magnetohidrodinamicii, fiind de mare interes atât teoretic cât și practic privind proiectarea și realizarea unor dispozitive magnetohidrodinamice cu metale topite.

Între aceste dispozitive pot fi enumerate: pompele magnetohidrodinamice, agitatoarele magnetohidrodinamice pentru metale topite, debitmetrele electromagnetice pentru metale topite etc.

Simplitatea constructivă, absența pieselor în mișcare, etanșeitățile perfecte, siguranța foarte mare în funcționare, întreținerea deosebit de ușoară sunt numai câteva din calitățile care atestă superioritatea pompelor magnetohidrodinamice de repulsie față de pompele clasice și care reclamă utilizarea lor în pomparea lichidelor electroconductoare.

De metodele de pompare electromagnetică a lichidelor electroconductoare cu ajutorul pompelor magnetohidrodinamice de repulsie pot beneficia o serie de ramuri ale economiei, precum tehnologia nucleară, industria chimică, industria constructoare de mașini și industria sticlei.

Cele mai reprezentative aplicații ale pompării electromagnetice a lichidelor electroconductoare s-au dezvoltat în legătură cu utilizarea metalelor alcaline (sodiu, potasiu și aliajele lor) în instalațiile de transfer termic ale reactoarelor energetice cu neutroni rapizi [39, 84, 141, 147]. Apoi aplicațiile au inclus industria metalurgică, în procesele de transport, turnare, agitare, tratare, (degazare, purificare etc.) în stare topită a multor metale și aliaje [1, 10, 24, 39, 42, 74, 93, 142, 143, 149].

Aplicațiile pompării electromagnetice în metalurgie cuprind atât ramura neferoasă, procesele de elaborare și turnare ale aluminiului, cuprului, zincului, magneziului, plumbului, staniului etc., cât și metalurgia oțelului și fontei.

Proprietățile fizico-chimice ale acestor metale în stare

topită condiționează în mare măsură conceperea, proiectarea și realizarea pompelor magnetohidrodinamice de repulsie. Aceste proprietăți sunt, în general, foarte diferite: temperaturile la care metalele uzuale se află în stare lichidă variază între 25°C și 1550°C, conductivitatea electrică acoperă un domeniu larg, între $0,6 \cdot 10^6$ $1/\Omega \cdot m$ și $0,8 \cdot 10^6$ $1/\Omega \cdot m$, densitatea, vâscozitatea cinematică și căldura specifică variază mult de la un metal la altul și în funcție de temperatură, iar reactivitatea chimică și compatibilitatea cu alte materiale în contact diferă de asemenea mult de la un metal la altul.

Alte aplicații tehnologice ale antrenării electromagnetice a lichidelor electroconductoare cu ajutorul pompelor magnetohidrodinamice de repulsie pot fi întâlnite în instalațiile pentru transportul și turnarea mercurului, precum și în instalațiile de tras sticlă pe baie de metal topit [39, 147].

Există puține firme în lume producătoare de pompe magnetohidrodinamice de repulsie, dintre cele mai importante amintindu-se: General Electric Company (GEC), SUA; ASEA, Suedia; English Electric Co, Anglia; Groupement Atomique Alsacienne Atlantique (GAAA), Franța; CFEI Saphymo-Stel, Franța.

În principiu, pompa magnetohidrodinamică de repulsie constă dintr-o bobină alimentată în curent alternativ monofazat și inclusă într-un circuit magnetic, care prezintă un întrefier cu configurație inelară. Atunci când acest întrefier, străbătut de câmpul magnetic inductor, variabil în timp, se află într-o baie de lichid electroconductor, prin interacțiunea câmp-curent indus, apare un efect de respingere a mediului indus, în raport cu inductorul. Printr-o construcție (cuvă) atașată întrefierului, acest efect asigură pomparea electromagnetică a lichidului electroconductor.

Prin urmare pompa magnetohidrodinamică de repulsie este o pompă de inducție cu alimentare monofazată. Ea are performanțe ridicate și este mult mai simplă decât pompele de inducție cu alimentare polifazată, la care câmpul magnetic inductor este un câmp magnetic învârtitor sau progresiv (liniar).

Faptul că pompa magnetohidrodinamică de repulsie constituie

soluția cea mai bună a unor probleme legate de pomparea electromagnetică a lichidelor electroconductoare este dovedit de numărul mare de lucrări apărute în acest domeniu în literatura de specialitate.

Data fiind complexitatea sa, problema curgerii unui lichid electroconductor, vâscos și incompresibil printr-un canal plasat într-un câmp magnetic exterior a fost studiată de matematicieni, fizicieni și ingineri [36, 53, 83, 84, 105]. Într-o serie de lucrări teoretice și experimentale dedicate curgerii fluidelor electroconductoare în câmp magnetic s-a stabilit dependența dintre viteza lichidului electroconductor și dimensiunile și forma secțiunii conductei de curgere, intensitatea și orientarea câmpului magnetic în care se mișcă lichidul electroconductor, grosimea și conductivitatea pereților conductei etc.

Din punct de vedere matematic toate aceste lucrări pot fi grupate în trei categorii, după cum rezolvarea problemelor legate de curgerea lichidelor electroconductoare în conducte plasate în câmp magnetic se face pe model unidimensional, bidimensional și tridimensional. Deși valoroase din punct de vedere matematic, rezultatele cercetărilor făcute pe modele bidimensionale și tridimensionale sunt practic inutilizabile în activitatea de proiectare. De asemenea, cercetările efectuate pe modele unidimensionale conduc la rezultate care sunt însă dificil de interpretat și de utilizat într-un calcul de proiectare datorită numărului mare de coeficienți care intervin în expresiile deduse.

Având în vedere cele de mai sus, în scopul îmbunătățirii calității pompelor magnetohidrodinamice de repulsie produse în țară, în lucrarea de față se abordează probleme privind proiectarea asistată de calculator a dispozitivelor electromagnetice ce constituie organul motor al acestor pompe magnetohidrodinamice de repulsie.

1.2. OBIECTIVELE TEZEI

Prezenta teză își propune drept obiectiv principal optimizarea dispozitivelor electromagnetice din componența pompelor magnetohidrodinamice de repulsie prin utilizarea calculatoarelor electronice atât în faza de proiectare cât și în faza de analiză a unor astfel de dispozitive electromagnetice de vehiculare a lichidelor electroconductoare proiectate sau executate deja.

În acest scop se va concepe o metodică de calcul electromagnetic și termic al dispozitivelor electromagnetice destinate antrenării lichidelor electroconductoare în vederea proiectării asistate de calculator a acestora.

De asemenea se vor studia și aplica metode de optimizare a proiectării dispozitivelor electromagnetice de vehiculare a lichidelor electroconductoare cu ajutorul calculatorului.

În vederea analizei solicitărilor magnetice și termice a unor dispozitive electromagnetice de antrenare a lichidelor electroconductoare proiectate sau executate deja se vor concepe și prezenta algoritmi și programe de analiză numerică a câmpului magnetic și termic al acestora.

Toate aceste programe se vor grupa într-un sistem de programe de proiectare optimală și analiză numerică a dispozitivelor electromagnetice din componența pompelor magnetohidrodinamice de repulsie denumit SPPADEM, care să poată fi rulat pe un calculator personal compatibil IBM.

La baza stabilirii obiectivelor prezentate anterior au stat următoarele argumente:

- ◆ pe măsura scăderii prețului lor în timp și a creșterii performanțelor lor hardware (viteză de calcul, capacitatea memoriei operative și viteza sa de acces, facilitățile grafice, viteza și controlul comunicațiilor la distanță etc.) și software, calculatoarele personale (PC) tind să fie utilizate în cele mai diferite sectoare ale activității tehnice și economico-sociale;

- ◆ informatica a conceput și dezvoltat o serie de programe

de tip CAD (Computer Aided Design) utilizabile pe PC-uri, acestea fiind azi un instrument aproape comun pentru cele mai diverse activități de proiectare în construcții, arhitectură, dezvoltare tehnologică, organizare și conducere de orice natură, cercetări aplicative de toate tipurile etc.;

♦ cercetarea, proiectarea, optimizarea și analiza dispozitivelor electromagnetice din componența pompelor magnetohidrodinamice de repulsie solicită din partea proiectantului multă rutină, acesta fiind pus deseori în postura de a rezolva calcule lungi și complicate, sau de a realiza prelucrări grafice complexe, care necesită experiență și dexteritate. Elaborarea și punerea la dispoziția proiectantului a unor programe performante, ușor de mânuit și suficient de rapide, permite concentrarea acestuia asupra analizei problemei tehnice propriu-zise, asupra analizei variantei optime. Avantajele deosebite se reflectă în economii de material, energie, manoperă și nu în ultimul rând, în timp.

1.3. STRUCTURA TEZEI

Lucrarea de față este structurată pe 8 capitole, la care se adaugă cuprinsul, bibliografia și 10 anexe.

Lucrarea debutează cu prezentarea generală, în capitolul 1, a construcției și celor mai reprezentative aplicații și preocupări actuale în domeniul pompelor magnetohidrodinamice de repulsie, precum și a obiectivelor și structurii tezei.

În continuare, în capitolul 2, lucrarea cuprinde prezentarea principiilor care stau la baza funcționării dispozitivelor electromagnetice destinate antrenării lichidelor electroconductoare și prezentarea unor soluții constructive și tehnologice de astfel de dispozitive electromagnetice utilizate în construcția pompelor magnetohidrodinamice de repulsie.

În capitolul 3, se prezintă mai întâi algoritmul (sau metodologia) de calcul electromagnetic a dispozitivelor electromagnetice utilizate la antrenarea lichidelor electroconductoare pornind de la legile de bază ale electrotehnicii și de la ecuațiile mecanicii fluidelor și urmărind utilizarea cât mai eficientă a calculatoarelor pentru realizarea proiectării, după care se descrie un program de proiectare asistată de calculator a acestor dispozitive electromagnetice, program întocmit pe baza algoritmului prezentat și se dă o aplicație a acestui program.

În capitolul 4 se face o prezentare a metodelor de optimizare a proceselor de proiectare, se formulează apoi problema de optimizare a dispozitivelor electromagnetice din componența pompelor magnetohidrodinamice de repulsie și se dau algoritmul și programul de optimizare a proiectării acestora. Capitolul se încheie cu prezentarea unor aplicații ale programului de optimizare descris anterior.

În capitolul 5 se prezintă analiza numerică cu ajutorul calculatoarelor a câmpului magnetic și a câmpului termic al dispozitivelor electromagnetice destinate antrenării lichidelor electroconductoare. Dintre metodele numerice elaborate și utilizate cu succes de-a lungul timpului în inginerie (și anume

metoda diferențelor finite, metoda elementelor finite și metoda elementelor de frontieră) s-a ales metoda elementelor finite, această metodă fiind utilizată, în prezent, aproape cu exclusivitate, în implementarea programelor de analiză numerică comercializate. Se prezintă mai întâi unele aspecte generale privind analiza numerică cu metoda elementelor finite, după care se dau algoritmi și programele de analiză numerică cu metoda elementelor finite a câmpului magnetic și câmpului termic al dispozitivelor electromagnetice de antrenare a lichidelor electroconductoare. Se prezintă, de asemenea, și aplicații, precum și concluzii asupra rezultatelor obținute în aplicații.

În capitolul 6 se prezintă structura și modul de utilizare a sistemului de programe de proiectare optimală și analiză numerică a dispozitivelor electromagnetice din componența pompelor magnetohidrodinamice de repulsie, denumit SPPADEM.

Încercările experimentale efectuate pe un dispozitiv electromagnetic de vehiculare a lichidelor electroconductoare existent sunt prezentate în capitolul 7. Prin compararea rezultatelor obținute prin măsurare cu cele determinate prin calcul se validează algoritmi și programele de proiectare, optimizare și analiză numerică a dispozitivelor electromagnetice ale pompelor magnetohidrodinamice de repulsie.

În final, în capitolul 8, sunt prezentate concluziile generale privitoare la lucrare, cu sublinierea contribuțiilor originale ale autorului.

*

*

*

Autorul consideră că lucrarea este utilă atât specialiștilor interesați de pomparea electromagnetică a lichidelor electroconductoare, cât și celor interesați de aplicarea metodelor numerice cu elemente finite în proiectarea dispozitivelor electromagnetice în general.

Doctorandul mulțumește cu deosebită căldură conducătorului

științific, Prof.Dr.Ing.Alexandru Vasilievici pentru îndrumarea permanentă și generoasă acordată la elaborarea și redactarea tezei și pentru rolul avut în sensul formării științifice a autorului.

Autorul exprimă profunda recunoștință Prof.Dr.Ing.Lucian Moldovan pentru atenția deosebită cu care a urmărit elaborarea și redactarea prezentei lucrări, pentru numeroasele și fructuoasele discuții pe marginea ei, pentru rolul avut la formarea sa științifică.

Mulțumesc domnilor Prof.Dr.Ing.Iacob Suciu, Prof.Dr.Ing.Ioan De Sabata, Prof.dr.ing.Ioan Vetreș și colegilor de la Facultatea de Electrotehnică cu care am purtat discuții amicale și fructuoase în timpul realizării tezei, precum și d-nei Vali Ștef pentru sprijinul acordat la tehnoredactarea manuscrisului.

În sfârșit, dar nu în ultimul rând doresc să aduc mulțumiri familiei pentru sprijinul și înțelegerea acordată în perioada elaborării lucrării.

CAPITOLUL 2

DISPOZITIVE ELECTROMAGNETICE DESTINATE ANTRENĂRII LICHIDELOR ELECTROCONDUCTOARE

2.1. DESCRIERE ȘI PRINCIPIU DE FUNCȚIONARE

Dispozitivele electromagnetice (DEM) utilizate în construcția pompelor magnetohidrodinamice de repulsie (PMHDR) reprezintă organul motor al acestora. Rolul acestor dispozitive electromagnetice este acela de a realiza conversia energiei electrice în energie mecanică, de deplasare a fluidului electroconductor care, în aplicațiile tehnologice, este un metal în stare topită.

Întrucât proprietățile fizico-chimice ale acestor metale în stare topită au o importanță deosebită în alegerea tipului constructiv al dispozitivului electromagnetic folosit pentru antrenarea prin efectul câmpului electromagnetic, acestea sunt prezentate în ANEXA 3.

O serie de metale neferoase precum aluminiul, magneziul, staniul au în stare lichidă valori ridicate ale conductivității electrice, favorabile pompării electromagnetice. Magneziul, mercurul și plumbul au agresivitate chimică redusă, canalele și conductele putând fi executate din diverse oțeluri, amagnetice și refractare. Altele, precum aluminiul și zincul sunt deosebit de agresive, circuitele de curgere realizându-se numai din grafit și oxizi ceramici refractari.

Oțelurile și fontele au temperatură ridicată de topire și conductivitate electrică mică în comparație cu alte metale. Acestea sunt, de asemenea, foarte active chimic, fiind compatibile doar cu anumite materiale refractare, cum ar fi șamotele, șamotele grafitate, refractarele cromomagnezite. Chiar și acestea însă au fiabilitate limitată, de obicei, la câteva luni de funcționare.

În cele ce urmează, vom înțelege prin dispozitiv electromagnetic pentru vehicularea lichidelor electroconductoare un ansamblu de două sisteme: electric și magnetic. Dispozitivul electromagnetic are în structura sa un miez fix format din material feromagnetic și o bobină de excitație parcursă de un curent alternativ monofazat.

Bobina este situată în circuitul magnetic al pompei magnetohidrodinamice de repulsie, care cuprinde atât miezul din material feromagnetic cât și medii nemagnetice: aerul, izolația termică, pereții băii de metal topit, metalul topit.

Pentru exemplificare, în fig.2.1. se prezintă o secțiune printr-o pompă magnetohidrodinamică de repulsie din componența unei instalații de topire și dozare utilizată la turnarea aliajelor neferoase [147]. Când bobina 4 este parcursă de un curent alternativ monofazat apare un câmp magnetic, majoritatea liniilor câmpului magnetic închizându-se pe traseul: miez magnetic central 3, peretele interior al conductei de curgere 7, fluid electroconductor situat în zona inelară de pompare 6, peretele exterior al conductei de curgere 7, izolație termică 2 și miezuri magnetice laterale 5. Fluxul magnetic variabil în timp care străbate miezul magnetic central 3 induce în fluidul electroconductor din zona inelară de pompare 6 o tensiune electromotoare. Această tensiune electromotoare generează în masa de lichid electroconductor un curent electric. Ca rezultat al interacțiunii câmp magnetic - curent indus apare un efect de respingere a masei de fluid electroconductor de către bobina inductoare.

Mișcarea lichidelor electroconductoare în câmp magnetic este descrisă de sistemul de ecuații al magnetohidrodinamicii, care cuprinde atât ecuațiile câmpului electromagnetic cât și ecuațiile hidrodinamicii [36]. Prin urmare, studiul mișcării lichidului electroconductor în câmp magnetic implică rezolvarea acestor ecuații, adică rezolvarea unei probleme de compatibilitate electromagnetică, domeniu de mare actualitate.

Ecuațiile câmpului electromagnetic, respectiv ecuațiile lui Maxwell sunt [110]:

$$\operatorname{rot} \bar{H} = \bar{J} \quad , \quad (2.1)$$

$$\operatorname{rot} \bar{E} = - \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad , \quad (2.2)$$

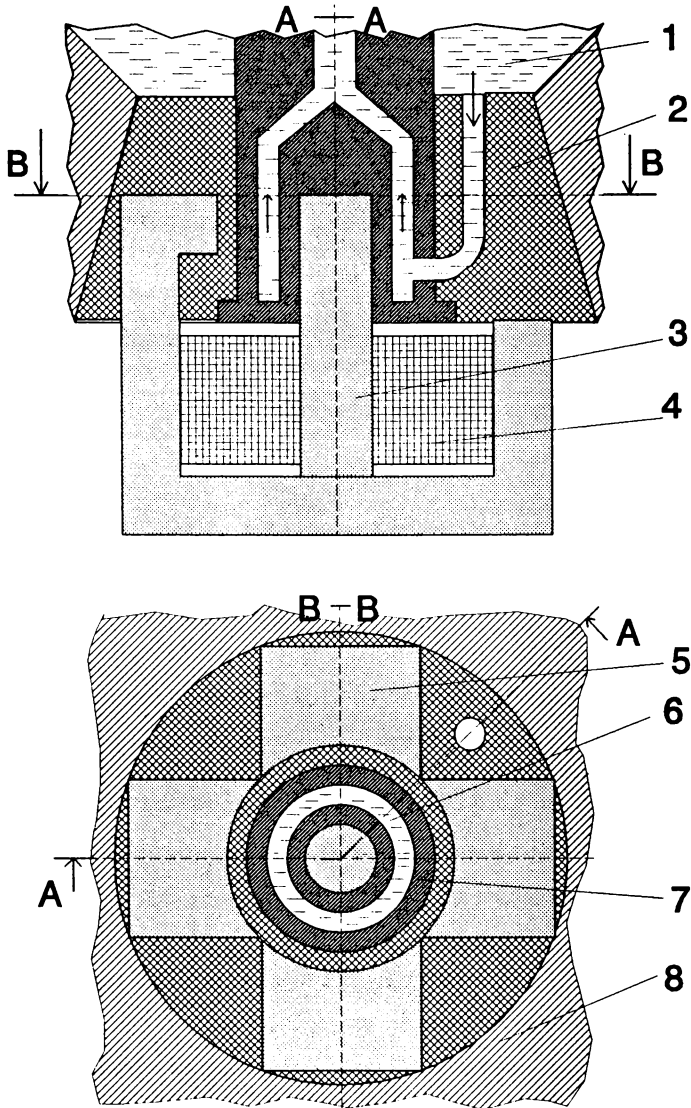


Fig.2.1. Pompă magnetohidrodinamică de repulsie. 1-baie de fluid electroconductor; 2-perete izolant termic; 3-miez magnetic central; 4-bobină; 5-miezuri magnetice laterale; 6-zonă inelară de pompare; 7-conductă de curgere; 8-perete instalație de topire și dozare.

$$\operatorname{div} \bar{B} = 0 \quad , \quad (2.3)$$

$$\operatorname{div} \bar{E} = 0 \quad , \quad (2.4)$$

$$\bar{B} = \mu \bar{H} \quad , \quad (2.5)$$

$$\bar{J} = \sigma \cdot [\bar{E} + (\bar{v} \times \bar{B})] \quad (2.6)$$

în care \bar{B} , \bar{H} , \bar{E} și \bar{J} sunt respectiv vectorii inducției magnetice, intensității câmpului magnetic, intensității câmpului electric și densității de curent, μ este permeabilitatea magnetică a lichidului electroconductor presupusă constantă, σ este conductivitatea electrică a lichidului electroconductor, iar \bar{v} este viteza fluidului electroconductor în raport cu sistemul de referință fix (neantrenat de fluidul electroconductor în mișcarea sa).

În cazul fluidelor electroconductoare, incompresibile și vâscoase, ecuațiile hidrodinamicii au o formă simplificată [43]. Ecuația continuității devine:

$$\operatorname{div} \bar{v} = 0 \quad (2.7)$$

iar ecuația mișcării fluidului și anume ecuația Navier-Stokes este:

$$\frac{d\bar{v}}{dt} = -\operatorname{grad} p + \rho_d \cdot \bar{g} + \bar{F}^* + \eta \cdot \Delta \bar{v} + (\bar{J} \times \bar{B}) \quad (2.8)$$

unde: ρ_d este densitatea lichidului electroconductor, \bar{g} este vectorul accelerație gravitațională, $\eta = \rho_d \cdot \nu$ este coeficientul de vâscozitate dinamică a fluidului electroconductor, ν este coeficientul de vâscozitate cinematică a fluidului electroconductor, $(\bar{J} \times \bar{B})$ este forța de natură electromagnetică ce acționează asupra lichidului din unitatea de volum, p este presiunea, Δ este operatorul Laplace, iar \bar{F}^* este o forță de altă natură decât electromagnetică care acționează asupra fluidului din unitatea de volum (dacă singura forță exterioară este gravitatea, atunci se consideră $\bar{F}^* = 0$).

La aceste ecuații se mai adaugă ecuația conservării energiei [83]:

$$\operatorname{div} \left[\left(H_i + \frac{1}{2} v^2 \right) \cdot \rho \cdot \vec{v} \right] - (\vec{J} \times \vec{B}) \cdot \vec{v} - \frac{1}{\sigma} J^2 = 0 \quad (2.9)$$

în care H_i este entalpia fluidului. Ecuația este scrisă în ipoteza că apare căldură numai datorită transformării ireversibile prin efect Joule și că există numai forțe de natură electromagnetică. Această ecuație se utilizează numai în cazul în care interesează în mod special distribuția temperaturii în fluid și influența ei asupra mișcării fluidului.

Deoarece în ecuația (2.6) intră și viteza de mișcare a lichidului electroconductor, este evident faptul că, în mod riguros, nu se poate determina câmpul electromagnetic independent de mișcare, astfel că sistemul ecuațiilor (2.1), (2.2), ..., (2.9) trebuie considerat în ansamblu. Cele două sisteme de ecuații - sistemul electrodinamicii și sistemul hidrodinamicii - se vor putea separa numai în cazul particular în care se consideră că lichidul electroconductor este în repaus. În acest caz, se determină mai întâi câmpul magnetic din sistemul electrodinamicii, astfel că expresia densității de forță electromagnetică din ecuația (2.8) devine cunoscută, după care se ajunge la problema clasică a hidrostaticii în care apare o forță suplimentară.

Rezolvarea analitică simultană a sistemului ecuațiilor (2.1)...(2.9), cu luarea în considerare a variațiilor reale ale mărimilor componente în cazul pompelor magnetohidrodinamice de repulsie, este practic imposibilă. Pentru a se putea obține însă soluții care să illustreze interdependența dintre fenomenele magnetice și hidrodinamice, se aproximează indusul (masa de fluid electroconductor având forma și dimensiunile zonei inelare de pompare) cu un mediu "cvasisolid" în care toate particulele se mișcă cu aceeași viteză. Considerând o valoare medie v_{med} a vitezei de deplasare a metalului topit în zona de pompare, se determină mai întâi câmpul electromagnetic și apoi, cunoscând variația câmpului electromagnetic și implicit, variația forței electromagnetice în zona de pompare, se poate determina variația vitezei de deplasare a fluidului electroconductor în zona de pompare.

2.2. SOLUȚII CONSTRUCTIVE ȘI TEHNOLOGICE DE DISPOZITIVE ELECTROMĂGNETICE DE VEHICULARE A LICHIDELOR ELECTROCONDUCTOARE

Elementele constitutive ale dispozitivelor electromagnetice folosite în construcțiile de pompe magnetohidrodinamice de repulsie sunt miezurile magnetice împreună cu bobina inductoare, alimentată în curent alternativ monofazat.

Miezurile magnetice ale dispozitivelor electromagnetice de antrenare a lichidelor electroconductoare se realizează în construcție împachetată, adică formate din pachete de tole presate și rigidizate. Aceste miezuri magnetice împachetate trebuie să satisfacă o serie de cerințe, ca: tolele să fie izolate între ele; la împachetare să se utilizeze tole bine debavurate; miezul să fie bine presat și strâns, fără interstiții între tole; să se respecte toleranțele prescrise; completarea tolelor trebuie să se facă nu după număr, ci după greutate; este necesar să se realizeze un factor de umplere maxim, fără depășirea presiunii de împachetare admisibilă și cu respectarea greutății de fier prescrise.

Pentru executarea tolelor din care se împachetează miezurile magnetice ale dispozitivelor electromagnetice de antrenare a lichidelor electroconductoare, se utilizează tabla silicioasă laminată, la rece cu cristale orientate (texturată) cu grosimea de $0,28 + 0,35$ mm, izolată cu carlit (izolație ceramică), având coeficientul de umplere de $0,94 + 0,95$ și cifra de pierderi $P_{10/50} = (0,4 \dots 1) W/kg$, iar curba de magnetizare, orientativă, cea din ANEXA 2.A. Prezența siliciului conduce la:

- ♦ micșorarea ciclului de histerezis al materialului tolei și deci micșorarea pierderilor prin histerezis;
- ♦ majorarea rezistenței electrice a tolei, ceea ce duce și la micșorarea curenților turbionari;
- ♦ înrăutățirea proprietăților mecanice ale tablei, aceasta devenind mai casantă.

Caracteristicile tehnologice ale confecționării miezurilor

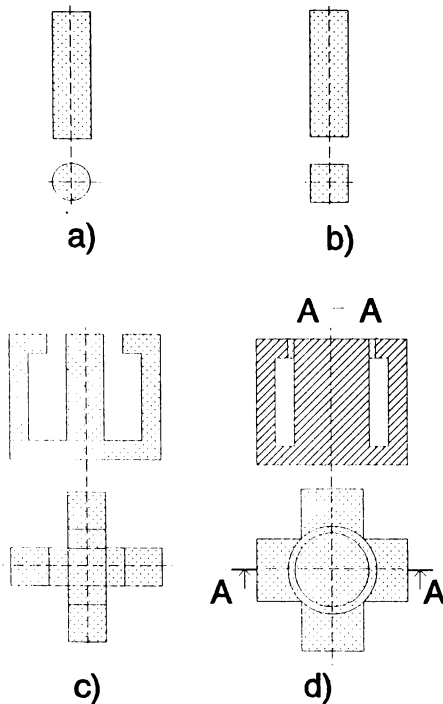


Fig.2.2. Tipuri constructive de miezuri magnetice utilizate la construcția dispozitivelor electromagnetice de vehiculare a lichidelor electroconductoare.

magnetice din tole împachetate, utilizate la dispozitivele electromagnetice ale pompelor magnetohidrodinamice de repulsie, diferă după forma constructivă a tolelor, după variantele de tăiere ale acestora din tablă silicioasă și după tipul utilajului de ștanțare [4, 64, 128].

Principalele tipuri constructive de miezuri magnetice din tole utilizate la construcția dispozitivelor electromagnetice ale pompelor magnetohidrodinamice de repulsie, produse de diverse firme, sunt prezentate în fig.2.2. [10, 141-144, 147, 149].

Pe porțiunea (ramura) centrală de formă cilindrică sau paralelipipedică, se plasează întotdeauna bobina inductoare alimentată în curent alternativ. Bobina se va executa (ținând seama de regimul termic al aplicației), din conductor plin, având numărul de spire corespunzător alimentării directe la rețeaua de joasă tensiune și fiind prevăzută de obicei cu mai multe prize de alimentare pentru a realiza intensități diferite ale câmpului magnetic în zona activă de pompare. Operațiile tehnologice utilizate la confecționarea bobinelor inductoare sunt examinate detaliat în tehnologia construcției de mașini [4, 54].

În întrefierul circuitului magnetic, ce cuprinde bobina inductoare și miezul feromagnetic, se plasează printr-o construcție ajutătoare fluidul electroconductor, acesta luând una din formele spațiale prezentate în fig.2.3.

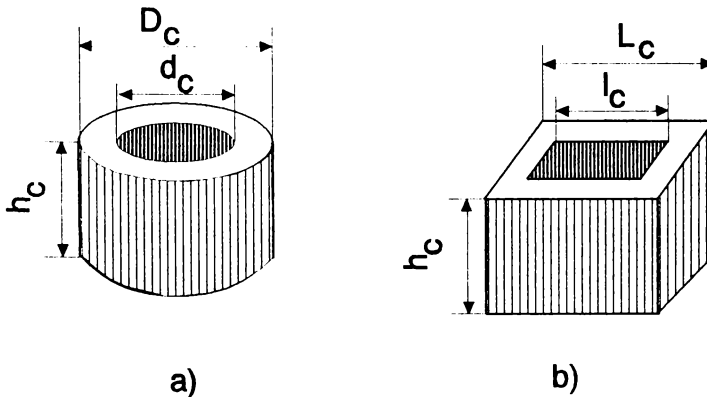


Fig.2.3. Forma geometrică spațială a lichidului electroconductor în zona de pompare.

Trebuie menționat faptul că proiectarea unui dispozitiv electromagnetic de vehiculare a lichidelor electroconductive presupune cunoașterea de către proiectant a tuturor condițiilor tehnologice de executare a acestuia, altfel existând riscul ca pompa magnetohidrodinamică de repulsie ce conține acest dispozitiv electromagnetic să nu funcționeze niciodată.

CAPITOLUL 3

PROIECTAREA ASISTATĂ DE CALCULATOR A DISPOZITIVELOR ELECTROMAGNETICE DE VEHICULARE A LICHIDELOR ELECTROCONDUCTOARE

3.1. CONSIDERAȚII ASUPRA PROIECTĂRII ASISTATE DE CALCULATOR

Realizarea oricărui echipament electric - deci și a dispozitivelor electromagnetice din componența pompelor magnetohidrodinamice de repulsie - care are de îndeplinit anumite funcții în condiții bine precizate, impune desfășurarea în prealabil a unei activități de proiectare. Activitatea de proiectare care stă la baza construirii unui echipament electric în general cuprinde următoarele faze:

- ◆ Stabilirea temei de proiectare în conformitate cu cerințele beneficiarului;

- ◆ Elaborarea metodologiei de proiectare și stabilirea criteriilor de optimizare;

- ◆ Verificarea corectitudinii temei de proiectare și a posibilității de realizare a proiectului;

- ◆ Generarea variantelor structurale posibile ale soluției problemei de proiectare;

- ◆ Analiza din punct de vedere a costului și a calității fiecărei variante ținând cont și de evoluția tendințelor de dezvoltare a tehnicii în domeniul respectiv;

- ◆ Selectarea variantei optime după criteriile luate în considerare;

- ◆ Prezentarea soluției, elaborarea ei în detaliu și întocmirea documentației tehnice, ce trebuie să fie completă, clară și corectă, permițând totodată, realizarea ușoară a modificărilor impuse de producția de serie sau de exploatare.

La cerințele actuale de reducere a consumului de materiale și energie, de îmbunătățire a calității și a caracteristicilor funcționale ale produselor noi și de reducere a perioadei de proiectare, se poate răspunde corect și în timp util numai cu ajutorul unor sisteme care fac apel la posibilitățile calculatoarelor. Numai astfel se pot depăși dificultățile legate de volumul de calcule și complexitatea unor algoritmi pentru parcurgerea unui număr mare de variante posibile în vederea alegerii celei mai bune soluții. Este folosită astfel principala caracteristică a calculatoarelor, de acumulator de "inteligentă", de cunoștințe teoretice și de experiență tehnică și economică.

Utilizarea calculatoarelor electronice permite o abordare mai completă și mai bine fundamentată din punct de vedere științific și matematic a problemelor ce se pun în activitatea de proiectare.

Avantajele pe care le oferă sistemele moderne de proiectare asistată de calculator (sisteme CAD) sunt următoarele [133, 79]:

- ◆ posibilitatea întocmirii proiectelor într-un număr maxim de variante în condițiile utilizării unui număr minim de componente;
- ◆ realizarea proiectelor de execuție într-un timp minim;
- ◆ sporirea capacității de modificare operativă a obiectivelor de proiectare în raport cu cerințele ce apar;
- ◆ selectarea soluțiilor ce satisfac simultan fiabilitate și performanțe ridicate, la prețuri de cost minime;
- ◆ automatizarea operațiilor de rutină, inclusiv editarea documentației permițând valorificarea superioară a potențialului ingineresc în alte activități (cercetare, dezvoltare, marketing etc.).

Structura unui sistem CAD este prezentată schematic în fig.3.1.

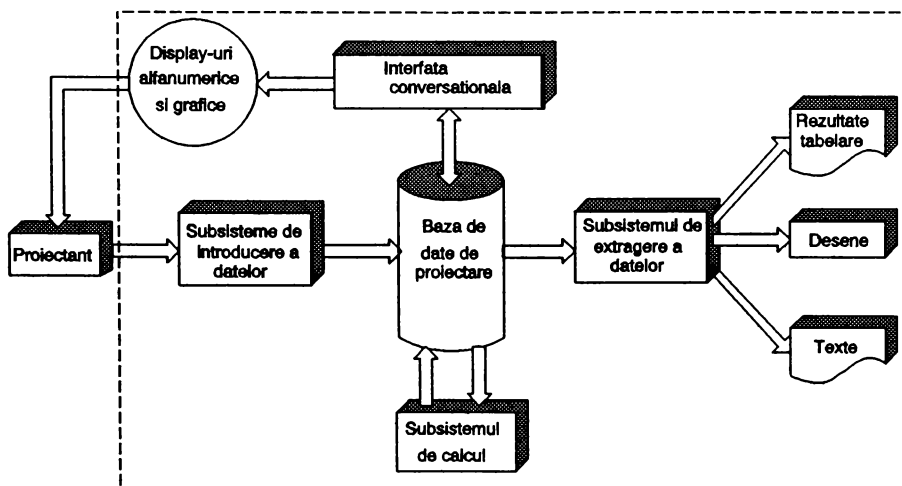


Fig.3.1. Structura unui sistem CAD.

În baza considerentelor prezentate anterior se concepe în continuare un algoritm și un program de proiectare a dispozitivelor electromagnetice de antrenare a lichidelor electroconductive, algoritm ce poate fi implementat pe un calculator personal PC/AT 486.

3.2. DATE DE PROIECTARE

Proiectarea dispozitivelor electromagnetice ale pompelor magnetohidrodinamice de repulsie poate fi privită ca un proces productiv care are la intrare tema de proiectare, utilizează un ansamblu de metode de calcul și restricții de proiectare, având la ieșire proiectul de execuție.

În tema de proiectare sunt precizate întotdeauna condițiile impuse de beneficiar. Aceste condiții reprezintă o parte din datele inițiale necesare calculului de proiectare a dispozitivelor electromagnetice de vehiculare a lichidelor electroconductoare și sunt de obicei următoarele:

♦ *Presiunea utilă*, P_u a pompei magnetohidrodinamice de repulsie, în N/m^2 ;

♦ *Debitul volumic*, V de lichid electroconductor vehiculat de pompa magnetohidrodinamică de repulsie, în m^3/s , ce poate fi calculat cu relația [88]:

$$V = S_t \cdot V_{med} \quad (3.1)$$

în care: S_t este aria secțiunii transversale de trecere a curentului de fluid electroconductor, în m^2 ;

V_{med} - viteza medie în secțiunea transversală de trecere a curentului de fluid electroconductor, în m/s .

♦ *Fluidul electroconductor* ce urmează a fi antrenat electromagnetic și *proprietățile fizice ale acestuia*, care se referă la:

- temperatura de topire θ_f , în $^{\circ}C$;
- conductivitatea electrică σ , în $1/\Omega m$;
- densitatea ρ_d , în kg/m^3 ;
- vâscozitatea cinematică ν , în m^2/s ;
- conductivitatea termică λ , în $W/m \cdot grd$;
- căldura specifică masică c , în $J/kg \cdot grd$.

♦ *Caracteristicile sursei de alimentare*, care pentru dispozitivul electromagnetic al pompei magnetohidrodinamice de repulsie sunt:

- tensiunea de alimentare U , în V ;
- frecvența f , în Hz .

Față de aceste date, din experiența proiectării de dispozitive electromagnetice pentru pompe magnetohidrodinamice de repulsie, sau din recomandările date în literatura de specialitate [141], proiectantul mai adoptă unele mărimi:

♦ În primul rând, se impune **valoarea maximă a inducției magnetice** B_{Fecm} , în T , în coloana centrală a miezului feromagnetic pe care este dispusă bobina inductoare. Aceasta oglindește gradul de solicitare magnetică a miezului feromagnetic, de valoarea ei depinzând volumul miezului feromagnetic și deoarece fluxul magnetic este variabil în timp și încălzirea dispozitivului electromagnetic de vehiculare a lichidelor electroconductoare.

Pentru un miez feromagnetic realizat din tole de tablă laminată la rece, cu cristale orientate, cu grosimea de $(0,28...0,35)$ mm și pierderi de magnetizare reduse $P_{10/50} = 0,45 W/kg$ se poate considera $B_{Fecm} = (1,2...1,4) T$ (se va lua de regulă în apropierea cotului curbei de magnetizare).

♦ În al doilea rând, se adoptă **densitatea de curent din înfășurare** J_1 , **coeficientul de împachetare al miezului feromagnetic**, K_{Fe} , **factorul de formă al dispozitivului electromagnetic** (definit în subcapitolul 3.4.3) ff , **coeficientul de umplere al înfășurării** K_u și se mai dau unele mărimi de material ca **densitatea**, ρ_{dcu} , **rezistivitatea la temperatura mediului ambiant** ρ_1 și **supratemperatura maximă admisibilă** $\bar{\tau}_{adm}$ a înfășurării, precum și **caracteristica de magnetizare a fierului circuitului magnetic**.

Se calculează de asemenea, conform [116, 30], coeficientul mediu de transmitere a căldurii prin convecție α la suprafața exterioară a bobinei inductoare.

♦ În al treilea rând, se stabilesc **dimensiunile constructive ale grosimii pereților canalului de curgere** a lichidului electroconductor în zona de pompare (întrefier), a_1 și **grosimii izolației termice** a_2 dintre miezul feromagnetic și canalul de

curgere (vezi fig.3.2). Condiția de randament maxim, al pompei magnetohidrodinamice de repulsie, impune ca aceste mărimi să aibă valori cât mai mici. Aceste dimensiuni sunt limitate însă inferior de rezistența mecanică a canalului de curgere și de fluxul termic de la canalul de curgere la miezul feromagnetic.

De exemplu, pentru metalele alcaline se folosesc canale de curgere cu pereți metalici din oțel refractar nemagnetic, iar la presiuni până la $5 + 6$ atm și temperaturi ale lichidului electroconductor de până la $500 + 600^{\circ}\text{C}$, sunt suficienți pereți metalici de $0,8 + 1$ mm grosime, forțele datorate presiunii interioare fiind preluate prin izolația termică de către miezul magnetic.

Izolația termică se va executa din materiale cu conductivitate cât mai redusă (materiale refractare poroase) și în același timp cu rezistență mare la compresie. O apreciere aproximativă a grosimii izolației termice se face considerând o cădere de temperatură de 100°C pe un milimetru de grosime a acesteia [39].

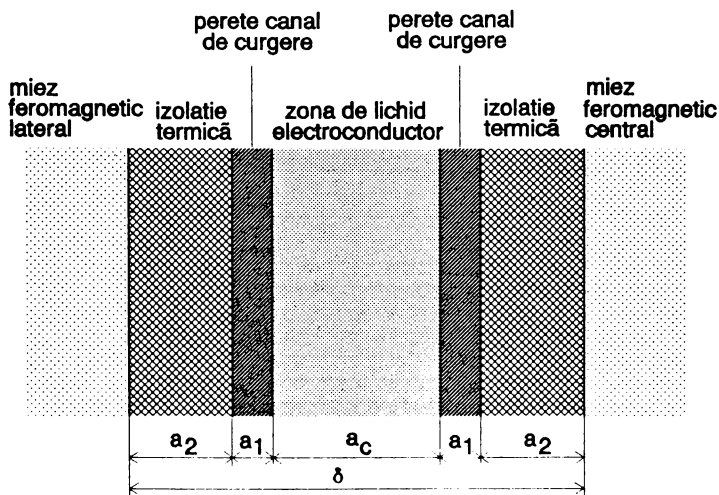


Fig.3.2. Structura întrefierului dispozitivelor electromagnetice ale pompelor magnetohidrodinamice de repulsie.

♦ În al patrulea rând, proiectantul își stabilește *tipul constructiv de miez feromagnetic* (vezi fig.2.2.), *forma constructivă a bobinei* (pătrată sau rotundă) și *forma și dimensiunile zonei inelare de pompare* ocupată de lichidul electroconductor (vezi fig.2.3.). În acest mod se stabilesc principalele date de proiectare ale dispozitivului electromagnetic al pompei magnetohidrodinamice de repulsie, date care vor sta la baza algoritmului și programului de proiectare asistată de calculator a dispozitivelor electromagnetice de vehiculare a lichidelor electroconductoare.

Înainte însă de a trece la stabilirea algoritmului și programului de proiectare asistată de calculator a dispozitivelor electromagnetice de vehiculare a lichidelor electroconductoare, se va determina, pornind de la ecuațiile magnetohidrodinamicii prezentate în capitolul 2, distribuția aproximativă a câmpului electromagnetic și a vitezei lichidului electroconductor în întrefierul δ al acestor dispozitive (vezi fig.3.2.).

3.3. DETERMINAREA APROXIMATIVĂ A DISTRIBUȚIEI CÂMPULUI ELECTROMAGNETIC ȘI A VITEZEI LICHIDULUI ELECTROCONDUCTOR ÎN ÎNTREFIERUL DISPOZITIVELOR ELECTROMAGNETICE ALE POMPELOR MAGNETOHIDRODINAMICE DE REPULSIE

Distribuția câmpului electromagnetic în întrefierul dispozitivelor electromagnetice ale pompelor magnetohidrodinamice de repulsie se va studia în baza următoarelor ipoteze de calcul:

- ◆ Lichidul electroconductor din zona de pompare este incompresibil, vâscos, și are o viteză de curgere perpendiculară pe vectorul inducție magnetică, constantă în orice punct din zona de pompare și egală cu o valoare medie v_{med} (ipoteză denumită în literatură drept prima aproximație magnetohidrodinamică);

- ◆ Se neglijează influența straturilor nemagnetice (și anume a izolației termice de grosime a_2 și a pereților canalului de curgere a lichidului electroconductor de grosime a_1) asupra câmpului magnetic;

- ◆ Se neglijează efectele de capăt și marginale;

- ◆ Se consideră că miezul feromagnetic are permeabilitatea magnetică (μ_{pec}) foarte mare și conductivitatea electrică nulă, iar lichidul electroconductor din întrefierul circuitului magnetic al pompei magnetohidrodinamice de repulsie are permeabilitatea magnetică $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} H/m$ și conductivitatea electrică σ de valoare finită;

- ◆ Se neglijează reacția curenților induși în lichidul electroconductor asupra câmpului magnetic inductor.

- ◆ Bobina inductoare este alimentată în curent alternativ monofazat de forma:

$$i_1 = i_{1m} \cdot \sin(\omega_1 t - \varphi_1) \quad (3.2)$$

cu: i_{1m} - amplitudinea curentului electric ce parcurge bobina;

$\omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot f$ - pulsația curentului electric;

f - frecvența;

t - timpul;

φ_1 - defazajul dintre tensiunea de alimentare a bobinei inductoare și curentul ce străbate bobina.

a) *Cazul dispozitivelor electromagnetice, ale pompelor magnetohidrodinamice de repulsie, având forma și dimensiunile din fig.3.3.*

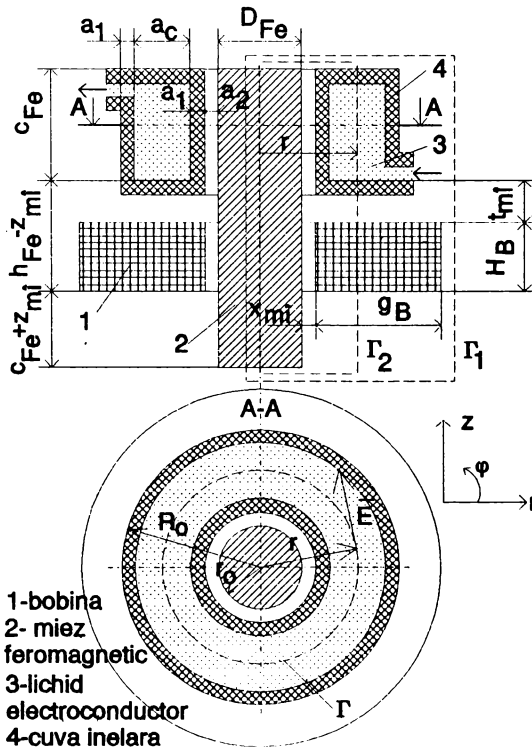


Fig.3.3. Modelul I de calcul aproximativ al distribuției câmpului electromagnetic în întrefierul dispozitivelor electromagnetice ale pompelor magnetohidrodinamice de repulsie.

Aplicând legea circuitului magnetic pe conturul Γ_1 și neglijând câmpul din exteriorul miezului feromagnetic se obține relația:

$$H_{Fecm} \cdot (h_{Fe} + 2 \cdot C_{Fe}) = i_1 \cdot N_1 \quad (3.3.)$$

în care: H_{Fec} este intensitatea câmpului magnetic în miezul feromagnetic, iar C_{Fe} , h_{Fe} , i_1 și N_1 au semnificațiile prezentate anterior.

Inducția magnetică în miezul feromagnetic B_{Fec} este:

$$B_{Fec} = \mu_{Fec} \cdot \frac{i_1 \cdot N_1}{h_{Fe} + 2 \cdot C_{Fe}} = \frac{\mu_{Fec} \cdot i_{1m} \cdot N_1}{h_{Fe} + 2 \cdot C_{Fe}} \cdot \sin(\omega_1 t - \varphi_1) \quad (3.4)$$

Fluxul magnetic prin suprafața mărginită de curba Γ , are expresia:

$$\Phi_{s\Gamma} = B_{Fec} \cdot \pi \cdot r_0^2 = \frac{\mu_{Fec} \cdot i_{1m} \cdot N_1}{h_{Fe} + 2 \cdot C_{Fe}} \cdot \pi \cdot \frac{D_{Fe}^2}{4} \cdot \sin(\omega_1 t - \varphi_1) \quad (3.5)$$

Din legea inducției electromagnetice aplicată pe curba închisă Γ rezultă intensitatea câmpului electric indus în lichidul electroconductor:

$$\begin{aligned} E(r, t) &= - \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot \frac{\mu_{Fec} \cdot i_{1m} \cdot N_1}{h_{Fe} + 2 \cdot C_{Fe}} \cdot \frac{\pi \cdot D_{Fe}^2}{4} \cdot \omega_1 \cdot \cos(\omega_1 t - \varphi_1) = \\ &= - \frac{\mu_{Fec} \cdot i_{1m} \cdot N_1 \cdot D_{Fe}^2 \cdot \omega_1}{8 \cdot (h_{Fe} + 2 \cdot C_{Fe})} \cdot \frac{\cos(\omega_1 \cdot t - \varphi_1)}{r} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Densitatea de curent \vec{J} a curenților turbionari induși în lichidul electroconductor rezultă din legea conducției electrice [110]:

$$\vec{J} = \sigma \cdot (\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}) \quad (3.7)$$

în care σ este conductivitatea electrică a lichidului electroconductor, \vec{v} este vectorul vitezei lichidului electroconductor în zona de pompare, iar \vec{B} este vectorul inducție magnetică în zona de pompare.

Aplicând legea circuitului magnetic pe conturul Γ_2 rezultă intensitatea câmpului magnetic inductor în lichidul electroconductor $H(r, t)$:

$$\begin{aligned}
 H(r, t) &= \frac{(i_1 \cdot N_1^*) \cdot [r - (r_0 + x_{mf})] \cdot H_B}{h_{Fe} + 2 \cdot C_{Fe}} = \\
 &= \frac{i_1 \cdot N_1}{H_B \cdot g_B} \cdot \left[r - \left(\frac{D_{Fe}}{2} + x_{mf} \right) \right] \cdot H_B \\
 &= \frac{i_{1m} \cdot N_1}{(h_{Fe} + 2 \cdot C_{Fe}) \cdot g_B} \cdot \left[r - \left(\frac{D_{Fe}}{2} + x_{mf} \right) \right] \sin(\omega_1 t - \varphi_1)
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

în care $i_1 \cdot N_1^*$ reprezintă solenația pe unitatea de suprafață a bobinei inductoare.

Având în vedere relația (3.8) rezultă inducția magnetică $B(r, t)$ în zona de pompare:

$$\begin{aligned}
 B(r, t) &= \mu_0 \cdot H(r, t) = \frac{\mu_0 \cdot i_{1m} \cdot N_1}{(h_{Fe} + 2 \cdot C_{Fe}) \cdot g_B} \cdot \\
 &\cdot \left[r - \left(\frac{D_{Fe}}{2} + x_{mf} \right) \right] \cdot \sin(\omega_1 t - \varphi_1)
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

Din relațiile (3.6), (3.7) și (3.9) se determină expresia densității de curent a curenților turbionari induși în lichidul electroconductor, având succesiv:

$$\vec{V} \times \vec{B} = \begin{bmatrix} \bar{u}_r & \bar{u}_\varphi & \bar{u}_z \\ 0 & 0 & v_{med} \\ B(r, t) & 0 & 0 \end{bmatrix} = B(r, t) \cdot \vec{V}_{med} \cdot \bar{u}_\varphi \quad (3.10)$$

$$\vec{J} = J(r, t) \cdot \bar{u}_\varphi = \sigma \cdot [E(r, t) \cdot \bar{u}_\varphi + B(r, t) \cdot \vec{V}_{med} \cdot \bar{u}_\varphi] \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} J(r, t) = & - \frac{\sigma \cdot \mu_{Fec} \cdot i_{1m} \cdot N_1 \cdot D_{Fe}^2 \cdot \omega_1 \cdot \cos(\omega_1 t - \varphi_1)}{8(h_{Fe} + 2 \cdot C_{Fe})} + \\ & + \frac{\sigma \cdot \mu_0 \cdot i_{1m} \cdot N_1}{(h_{Fe} + 2 \cdot C_{Fe}) \cdot g_B} \cdot \left[r - \left(\frac{D_{Fe}}{2} + X_{mf} \right) \right] \cdot \sin(\omega_1 t - \varphi_1) \cdot v_{med} = \\ & = \frac{\sigma \cdot i_{1m} \cdot N_1}{h_{Fe} + 2 \cdot C_{Fe}} \cdot \left[\frac{\mu_0 \cdot v_{med}}{g_b} \cdot \left(r - \left(\frac{D_{Fe}}{2} + X_{mf} \right) \right) \cdot \right. \\ & \left. \cdot \sin(\omega_1 t - \varphi_1) - \frac{\mu_{Fec} \cdot D_{Fe}^2 \cdot f \cdot \pi}{4 \cdot r} \cdot \cos(\omega_1 t - \varphi_1) \right] \end{aligned} \quad (3.12)$$

În relațiile (3.10) și (3.11) s-au notat cu \bar{u}_r , \bar{u}_φ și \bar{u}_z versorii sistemului de referință considerat (vezi fig.3.3.).

Densitatea de volum a forței electromagnetice \vec{F}_v ce acționează asupra lichidului electroconductor este dată de relația:

$$\begin{aligned} \vec{F}_v = \vec{J} \times \vec{B} &= \begin{bmatrix} \bar{u}_r & \bar{u}_\varphi & \bar{u}_z \\ 0 & J(r, t) & 0 \\ B(r, t) & 0 & 0 \end{bmatrix} = \\ &= -J(r, t) \cdot B(r, t) \cdot \bar{u}_z = f_v(r, t) \cdot \bar{u}_z \end{aligned} \quad (3.13)$$

de unde rezultă :

$$\begin{aligned} \bar{F}_v = & \left[\frac{\sigma \cdot \mu_{Fec} \cdot \mu_0 \cdot i_{1m}^2 \cdot N_1^2 \cdot D_{Fe}^2 \cdot \pi \cdot f \cdot r - \left(\frac{D_{Fe}}{2} + x_{mf} \right)}{4 \cdot (h_{Fe} + 2 \cdot c_{Fe})^2 \cdot g_B} \cdot \frac{r - \left(\frac{D_{Fe}}{2} + x_{mf} \right)}{r} \right. \\ & \cdot \frac{\sin[2(\omega_1 t - \varphi_1)]}{2} - \frac{\sigma \cdot \mu_0^2 \cdot i_{1m}^2 \cdot N_1^2 \cdot V_{med}}{(h_{Fe} + 2 \cdot c_{Fe})^2 \cdot g_B^2} \cdot \\ & \left. \cdot \left[r - \left(\frac{D_{Fe}}{2} + x_{mf} \right) \right]^2 \cdot \sin^2(\omega_1 t - \varphi_1) \right] \cdot \bar{u}_z \end{aligned} \quad (3.14)$$

b) *Cazul dispozitivelor electromagnetice, ale pompelor magnetohidrodinamice de repulsie, având forma și dimensiunile din fig.3.4.*

Dacă admitem că dispersia este neglijabilă, în conformitate cu legea fluxului magnetic, în diferitele secțiuni ale circuitului magnetic considerat, fluxul magnetic fascicular este constant. Rezultă următoarele relații:

$$\phi_{Fec} = 4 \cdot \phi \quad (3.15)$$

$$\phi_{Fec} = 4 \cdot \phi_{Fej} \quad (3.16)$$

în care: ϕ_{Fec} este fluxul magnetic fascicular care străbate coloana centrală a miezului feromagnetic, ϕ_{Fej} este fluxul magnetic fascicular printr-un jug și o coloană laterală a miezului feromagnetic, iar ϕ reprezintă fluxul magnetic fascicular ce străbate întrefierul corespunzător unei ramuri a circuitului magnetic.

Din relațiile (3.15) și (3.16), având în vedere că secțiunea transversală a unei ramuri a circuitului magnetic reprezintă a 4-a parte din secțiunea transversală a coloanei centrale a miezului feromagnetic, rezultă că:

$$B_{Fec} = B_{Fej} = B \quad (3.17)$$

și deci:

$$\mu_{Fej} \cdot H_{Fej} = \mu_{Fec} \cdot H_{Fec} = \mu_0 \cdot H \quad (3.18)$$

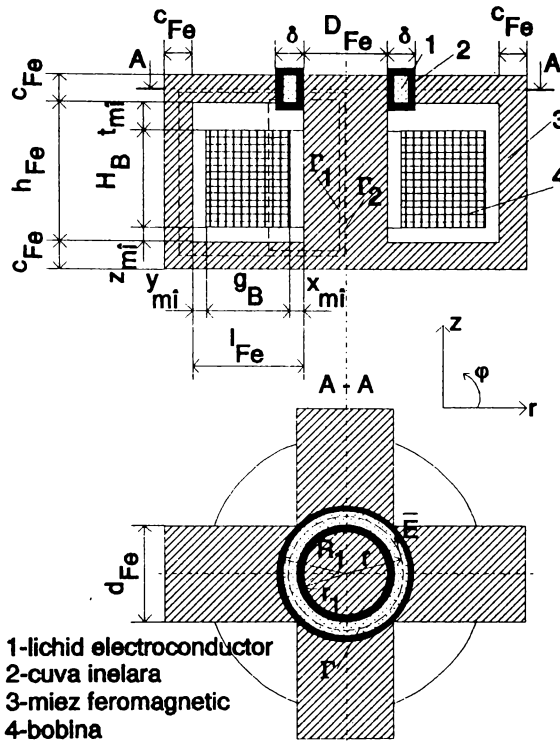


Fig.3.4. Modelul II de calcul aproximativ al distribuției câmpului electromagnetic în întrefierul dispozitivelor electromagnetice ale pompelor magnetohidrodinamice de repulsie.

În relațiile (3.17) și (3.18), B_{Fec} , B_{Fej} și B reprezintă inducțiile magnetice ale coloanei centrale, jugurilor și respectiv întrefierului circuitului magnetic, H_{Fec} , H_{Fej} și H sunt intensitățile câmpului magnetic în coloana centrală, juguri și respectiv întrefier, iar μ_{Fec} , μ_{Fej} și μ_0 reprezintă permeabilitățile magnetice ale fierului coloanei centrale,

jugurilor și respectiv a lichidului electroconductor din întrefierul circuitului magnetic.

Aplicând legea circuitului magnetic pe curba închisă Γ_2 rezultă:

$$H_{Fec} \cdot h_{Fe} + H \cdot \delta + H_{Fej} (D_{Fe} + 3 \cdot C_{Fe} + h_{Fe} + 2 \cdot l_{Fe} - \delta) = i_1 \cdot N_1 \quad (3.19)$$

Rezolvând sistemul de ecuații format din ecuațiile (3.18) și (3.19) se obțin intensitățile câmpului magnetic în coloana centrală, juguri și întrefier:

$$H_{Fec} = \frac{i_{1m} \cdot N_1 \cdot \sin(\omega_1 t - \varphi_1)}{h_{Fe} + \frac{\mu_{Fec}}{\mu_0} \cdot \delta + \frac{\mu_{Fec}}{\mu_{Fej}} \cdot (D_{Fe} + 3 \cdot C_{Fe} + h_{Fe} + 2 \cdot l_{Fe} - \delta)} \quad (3.20)$$

$$H_{Fej} = \frac{i_{1m} \cdot N_1 \cdot \sin(\omega_1 t - \varphi_1)}{\frac{\mu_{Fej}}{\mu_{Fec}} \cdot h_{Fe} + \frac{\mu_{Fej}}{\mu_0} \cdot \delta + D_{Fe} + 3 \cdot C_{Fe} + h_{Fe} + 2 \cdot l_{Fe} - \delta} \quad (3.21)$$

$$H = \frac{i_{1m} \cdot N_1 \cdot \sin(\omega_1 t - \varphi_1)}{\frac{\mu_0}{\mu_{Fec}} \cdot h_{Fe} + \delta + \frac{\mu_0}{\mu_{Fej}} \cdot (D_{Fe} + 3 \cdot C_{Fe} + h_{Fe} + 2 \cdot l_{Fe} - \delta)} \quad (3.22)$$

Din legea inducției electromagnetice aplicată pe curba închisă Γ rezultă intensitatea câmpului electric indus în lichidul electroconductor:

$$E(r, t) = - \frac{D_{Fe}^2 \cdot \omega_1 \cdot i_{1m} \cdot N_1}{8 \cdot \left(\frac{h_{Fe}}{\mu_{Fec}} + \frac{\delta}{\mu_0} + \frac{D_{Fe} + 3 \cdot C_{Fe} + h_{Fe} + 2 \cdot l_{Fe} - \delta}{\mu_{Fej}} \right)} \cdot \frac{\cos(\omega_1 t - \varphi_1)}{r} \quad (3.23)$$

Dacă se aplică legea circuitului magnetic pe conturul Γ_1 se va obține expresia intensității câmpului magnetic inductor în zona de pompare (întrefier) în funcție de raza curentă r și timpul t :

$$H(r, t) = \frac{i_{1m} \cdot N_1 \cdot \left[r - \left(\frac{D_{Fe}}{2} + x_{mf} \right) \right] \cdot \sin(\omega_1 t - \varphi_1)}{g_B \cdot \left[\frac{\mu_0}{\mu_{Fec}} \cdot h_{Fe} + \frac{\mu_0}{\mu_{Fej}} \cdot \left(\frac{3 \cdot C_{Fe}}{2} + D_{Fe} + \frac{\delta}{2} \right) + \frac{\delta}{2} + \frac{C_{Fe}}{2} \right]} \quad (3.24)$$

Densitatea de curent \vec{J} a curenților turbionari induși în lichidul electroconductor se obține din legea conducției electrice (relația (3.7)) în care se consideră:

$$\begin{aligned} \vec{E} &= E(r, t) \cdot \vec{u}_\varphi \\ \vec{V} &= v_{med} \cdot \vec{u}_z \\ \vec{B} &= \mu_0 \cdot H(r, t) \cdot \vec{u}_r \\ \vec{J} &= J(r, t) \cdot \vec{u}_\varphi \end{aligned} \quad (3.25)$$

În baza relațiilor (3.23), (3.24) și (3.25) rezultă pentru $J(r, t)$ expresia:

$$\begin{aligned} J(r, t) &= \sigma \left[E(r, t) + \mu_0 \cdot H(r, t) \cdot v_{med} \right] = \\ &= \frac{-\sigma \cdot D_{Fe}^2 \cdot \pi \cdot f \cdot i_{1m} \cdot N_1}{4 \cdot \left(\frac{h_{Fe}}{\mu_{Fec}} + \frac{\delta}{\mu_0} + \frac{D_{fe} + 3 \cdot C_{Fe} + h_{Fe} + 2 \cdot l_{Fe} - \delta}{\mu_{Fej}} \right)} \cdot \frac{\cos(\omega_1 t - \varphi_1)}{r} + \\ &+ \frac{\sigma \cdot \mu_0 \cdot v_{med} \cdot i_{1m} \cdot N_1 \cdot \left[r - \left(\frac{D_{Fe}}{2} + x_{mf} \right) \right] \cdot \sin(\omega_1 t - \varphi_1)}{g_B \cdot \left[\frac{\mu_0}{\mu_{Fec}} \cdot h_{Fe} + \frac{\mu_0}{\mu_{Fej}} \cdot \left(\frac{3 \cdot C_{Fe}}{2} + D_{Fe} + \frac{\delta}{2} \right) + \frac{\delta}{2} + \frac{C_{Fe}}{2} \right]} \end{aligned} \quad (3.26)$$

Densitatea de volum a forței electromagnetice \vec{F}_v care se exercită asupra lichidului electroconductor din zona de pompă este:

$$\vec{F}_v = \vec{J} \times \vec{B} = -J(r, t) \cdot \mu_0 \cdot H(r, t) \cdot \vec{u}_z = f_v(r, t) \cdot \vec{u}_z \quad (3.27)$$

unde:

$$f_v(r, t) = \frac{\sigma \cdot D_{Fe}^2 \cdot \pi \cdot f \cdot i_{1m}^2 \cdot N_1^2 \cdot \mu_0 \cdot \left(1 - \frac{D_{Fe}/2 + x_{mf}}{r}\right)}{4 \cdot g_B \cdot \left(\frac{h_{Fe}}{\mu_{Fec}} + \frac{\delta}{\mu_0} + \frac{D_{Fe} + 3 \cdot C_{Fe} + h_{Fe} + 2 \cdot l_{Fe} - \delta}{\mu_{Fej}}\right)} \cdot \frac{\sin[2(\omega_1 t - \varphi_1)]}{2} \cdot \left[\frac{\mu_0}{\mu_{Fec}} \cdot h_{Fe} + \frac{\mu_0}{\mu_{Fej}} \left(\frac{3 \cdot C_{Fe}}{2} + D_{Fe} + \frac{\delta}{2}\right) + \frac{\delta}{2} + \frac{C_{Fe}}{2} \right] \cdot \frac{\sigma \cdot \mu_0^2 \cdot v_{med} \cdot i_{1m}^2 \cdot N_1^2 \left[r - \left(\frac{D_{Fe}}{2} + x_{mf}\right)\right]^2 \cdot \sin^2(\omega_1 t - \varphi_1)}{g_B^2 \cdot \left[\frac{\mu_0}{\mu_{Fec}} \cdot h_{Fe} + \frac{\mu_0}{\mu_{Fej}} \left(\frac{3 \cdot C_{Fe}}{2} + D_{Fe} + \frac{\delta}{2}\right) + \frac{\delta}{2} + \frac{C_{Fe}}{2} \right]^2} \quad (3.28)$$

Din relațiile (3.14) și (3.28) rezultă pentru densitatea de volum a forței electromagnetice ce acționează asupra lichidului electroconductor din întrefier o expresie generală de forma:

$$\vec{F}_v = \left\{ \frac{\sigma \cdot \mu_0 \cdot \pi \cdot f \cdot i_{1m}^2 \cdot N_1^2}{8 \cdot g_B} \cdot C_1 \cdot \left(1 - \frac{C_2}{r}\right) \cdot \sin[2(\omega_1 t - \varphi_1)] - \frac{\sigma \cdot \mu_0^2 \cdot v_{med} \cdot i_{1m}^2 \cdot N_1^2}{g_B^2} \cdot C_3 \cdot (r - C_2)^2 \cdot \sin^2(\omega_1 t - \varphi_1) \right\} \cdot \vec{u}_z \quad (3.29)$$

în care: C_1 , C_2 și C_3 sunt constante ale căror valori depind de forma, dimensiunile și materialul din care este confecționat

miezul feromagnetic al dispozitivului electromagnetic de vehiculare a lichidelor electroconductoare.

Cunoscând, acum, variația câmpului electromagnetic și implicit variația densității de volum a forței electromagnetice în zona de pompare se poate trece la determinarea variației vitezei de deplasare a lichidului electroconductor în zona de pompare.

La alimentarea bobinei inductoare lichidul electroconductor din întrefier este pus în mișcare, viteza la pereții canalului de curgere va fi nulă, iar în rest viteza locală a lichidului electroconductor va fi rezultatul echilibrului local dintre densitățile forțelor electromagnetice și de vâscozitate și gradientul local al presiunii.

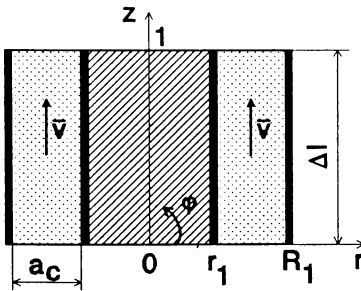


Fig.3.5. Model de calcul al distribuției vitezei lichidului electroconductor în întrefierul dispozitivelor electromagnetice ale pompelor magnetohidrodinamice de repulsie.

Fie modelul idealizat din fig.3.5., în care un lichid electroconductor, incompresibil și vâscos, curge, în regim laminar, cu o viteză \bar{v} (având componentă doar după axa oz, și fiind independentă de timp) într-un câmp magnetic cu o variație sinusoidală, cu amplitudinea inducției magnetice B_m , orientat după axa or și dependent de coordonata r.

Din ecuația continuității (2.7) rezultă că:

$$\frac{\partial v}{\partial z} = 0, \text{ deci } v = v(r, \varphi).$$

Ecuația mișcării lichidului [43, 39] (în regimul staționar considerat) va devenii:

$$\rho_d \cdot \mathbf{v} \cdot \Delta \bar{\mathbf{v}} + (\bar{\mathbf{J}} \times \bar{\mathbf{B}})_{med} + \rho_d \bar{\mathbf{g}} - grad p = 0 \quad (3.30)$$

în care $(\bar{\mathbf{J}} \times \bar{\mathbf{B}})_{med}$ este valoarea medie în timp a densității de

volum a forței electromagnetice, iar celelalte mărimi au semnificația prezentată anterior.

Valoarea medie în timp a densității de volum a forței electromagnetice se calculează cu următoarea relație:

$$(\overline{J \times \overline{B}})_{med} = \frac{1}{T} \int_0^T (\overline{J \times \overline{B}}) \cdot dt \quad (3.31)$$

unde T este perioada.

Efectuând integrala ce intervine în relația (3.31) se obține:

$$\begin{aligned} (\overline{J \times \overline{B}})_{med} &= \left[\frac{\sigma \cdot \mu_0 \cdot \pi \cdot f \cdot i_{1m}^2 \cdot N_1^2}{8 \cdot g_B} \cdot C_1 \left(1 - \frac{C_2}{R} \right) \cdot \frac{1}{T} \int_0^T \sin(2\omega_1 t - 2\varphi_1) \cdot dt - \right. \\ &- \left. \frac{\sigma \cdot \mu_0^2 \cdot v_{med} \cdot i_{1m}^2 \cdot N_1^2}{g_B^2} \cdot C_3 \cdot (R - C_2)^2 \cdot \frac{1}{T} \int_0^T \sin^2(\omega_1 t - \varphi_1) \cdot dt \right] \cdot \overline{u}_z = \\ &= \left[\frac{\sigma \cdot \mu_0 \cdot \pi \cdot f \cdot i_{1m}^2 \cdot N_1^2}{8 \cdot g_B} \cdot C_1 \left(1 - \frac{C_2}{R} \right) \cdot \frac{1}{T} \cdot 0 - \frac{\sigma \cdot \mu_0^2 \cdot v_{med} \cdot i_{1m}^2 \cdot N_1^2}{g_B^2} \cdot \right. \\ &\cdot C_3 \cdot (R - C_2)^2 \cdot \frac{1}{T} \cdot \frac{T}{2} \left. \right] \cdot \overline{u}_z = \left[\frac{-\sigma \cdot \mu_0^2 \cdot v_{med} \cdot i_{1m}^2 \cdot N_1^2}{2 \cdot g_B} \cdot C_3 \cdot (R - C_2)^2 \right] \cdot \overline{u}_z = \\ &= \left[-C_4 \cdot C_3 \cdot (R - C_2)^2 \right] \cdot \overline{u}_z \end{aligned} \quad (3.32)$$

Deoarece viteza \overline{v} are componentă numai după axa oz rezultă:

$$\Delta \overline{v} = \Delta v \cdot \overline{u}_z = \left(\frac{\partial^2 v}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial v}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial \varphi^2} \right) \cdot \overline{u}_z \quad (3.33)$$

Din motive de simetrie variația vitezei în raport cu coordonata φ este:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial \varphi^2} = 0 \quad (3.34)$$

Deci, rezultă:

$$\Delta \bar{v} = \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial v}{\partial r} \right) \cdot \bar{u}_z \quad (3.35)$$

Notând cu p_0 și p_1 valorile presiunii lichidului electroconductor în două puncte situate la distanța Δl (cu $\Delta l \rightarrow 0$), pe direcția și în sensul de curgere în ordinea precizată, gradientul longitudinal de presiune sub care are loc curgerea este:

$$\text{grad } p = \frac{\partial p}{\partial z} \cdot \bar{u}_z = -\frac{p_0 - p_1}{\Delta l} \cdot \bar{u}_z \quad (3.36)$$

În baza relațiilor (3.32), (3.35) și (3.36), ecuația vectorială (3.30) devine:

$$\rho_d \cdot \mathbf{v} \cdot \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial v}{\partial r} \right) - C_4 \cdot C_3 \cdot (r - C_2)^2 + \rho_d \cdot \mathbf{g} + \frac{p_0 - p_1}{\Delta l} = 0 \quad (3.37)$$

Împărțind ambii membri ai ecuației (3.37) cu $\rho_d \cdot \mathbf{v}$ rezultă:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{C_4 \cdot C_3}{\delta_d \cdot \mathbf{v}} \cdot (r - C_2)^2 + \frac{\mathbf{g}}{\mathbf{v}} + \frac{p_0 - p_1}{\rho_d \cdot \mathbf{v} \cdot \Delta l} = 0 \quad (3.38)$$

Cu notațiile:

$$K_1 = \frac{C_4 \cdot C_3}{\rho_d \cdot \mathbf{v}} \quad \text{și} \quad K_2 = \frac{\mathbf{g}}{\mathbf{v}} + \frac{p_0 - p_1}{\rho_d \cdot \mathbf{v} \cdot \Delta l} \quad (3.39)$$

ecuația (3.38) se scrie sub forma:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial v}{\partial r} = K_1 \cdot (r - C_2)^2 - K_2 \quad (3.40)$$

Înmulțind ambii membri ai ecuației (3.40) cu r^2 și având în vedere că v este funcție numai de r se obține o ecuație de tip Euler:

$$r^2 \cdot \frac{d^2 v}{dr^2} + r \frac{dv}{dr} = K_1 \cdot r^2 \cdot (r - C_2)^2 - K_2 \cdot r^2 \quad (3.41)$$

prin a cărei rezolvare (prezentată în ANEXA 4) rezultă funcția de variație după r a vitezei lichidului electroconductor în zona de pompare inelară:

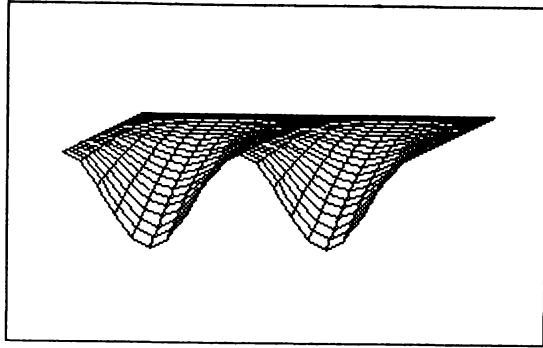
$$v(r) = \frac{K_1}{16} (r^4 - r_1^4) - \frac{2 \cdot K_1 \cdot C_2}{9} (r^3 - r_1^3) + \frac{K_1 \cdot C_2^2 - K_2}{4} (r^2 - r_1^2) + \frac{\ln \frac{r}{r_1}}{\ln \frac{r_1}{R_1}} \cdot \left[\frac{K_1}{16} (R_1^4 - r_1^4) - \frac{2 \cdot K_1 \cdot C_2}{9} (R_1^3 - r_1^3) + \frac{K_1 \cdot C_2^2 - K_2}{4} (R_1^2 - r_1^2) \right] \quad (A4.12)$$

în care constantele K_1 , C_2 și K_2 au expresiile prezentate anterior, iar r_1 și R_1 au semnificația rezultată din fig.3.5.

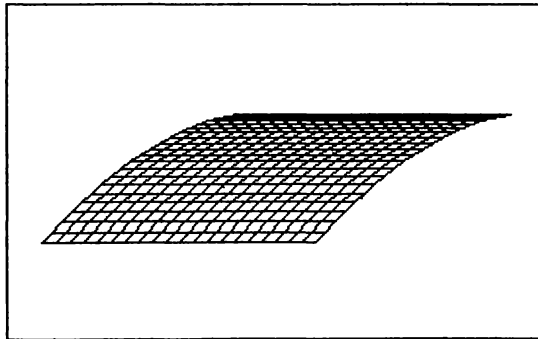
Cu ajutorul relațiilor (3.29) și (A4.12) se poate determina relația de calcul pentru puterea electromagnetică activă P_e transmisă lichidului electroconductor, iar cu valoarea puterii P_e se va calcula puterea activă absorbită de la rețea de către bobina inductoare și randamentul dispozitivului electromagnetic destinat antrenării lichidelor electroconductoare.

În fig.3.6.a este reprezentată variația în raport cu coordonatele r și t a densității de volum a forței electromagnetice ce acționează asupra plumbului în stare topită, vehiculat de dispozitivul electromagnetic cu datele din fig.4.8.

Pentru același dispozitiv electromagnetic este reprezentată în fig.3.6.b. variația în raport cu coordonatele r și ϕ a vitezei plumbului în stare topită, în zona de pompare inelară.



a)



b)

Fig.3.6. Graficele funcțiilor $f_v(r, t)$ și $v(r, \varphi)$ pentru dispozitivul electromagnetic de vehiculare a plumbului, având datele din fig.4.8.

- a) Graficul funcției $f_v(r, t)$
- b) Graficul funcției $v(r, \varphi)$

3.4. ALGORITM ȘI PROGRAM DE PROIECTARE ASISTATĂ DE CALCULATOR A DISPOZITIVELOR ELECTROMAGNETICE DE VEHICULARE A LICHIDELOR ELECTROCONDUCTOARE

Calculul de proiectare a unui dispozitiv electromagnetic de vehiculare a lichidelor electroconductoare urmărește dimensionarea principalelor elemente active: bobina inductoare de curent alternativ și circuitul magnetic, pornind de la necesitatea realizării performanțelor impuse de beneficiar în condiții date de încălzire și răcire a bobinei inductoare și ținând cont de aspectele tehnologice ale realizării acestor dispozitive electromagnetice de antrenare a lichidelor electroconductoare.

Etapetele algoritmului de proiectare a bobinei și miezului feromagnetic al unui dispozitiv electromagnetic, din componența unei pompe magnetohidrodinamice de repulsie, sunt indicate schematic în fig.3.7. și prezentate în detaliu în continuare.

3.4.1. Determinarea întrefierului δ al circuitului magnetic

În primul rând proiectantul stabilește, în baza unor considerente tehnice și economice, varianta constructivă de dispozitiv electromagnetic ce urmează a fi proiectat. Aceasta presupune alegerea tipului de miez feromagnetic și a formei constructive a bobinei inductoare.

Miezurile feromagnetice pot fi prevăzute cu juguri și coloane având secțiunea pătrată sau în trepte. Miezurile feromagnetice cu secțiunea pătrată sunt mai ușor de executat (prin împachetare din tole egale), însă bobinele corespunzătoare acestora se construiesc mai greu. În ceea ce privește miezurile feromagnetice cu secțiunea în trepte, acestea prezintă o

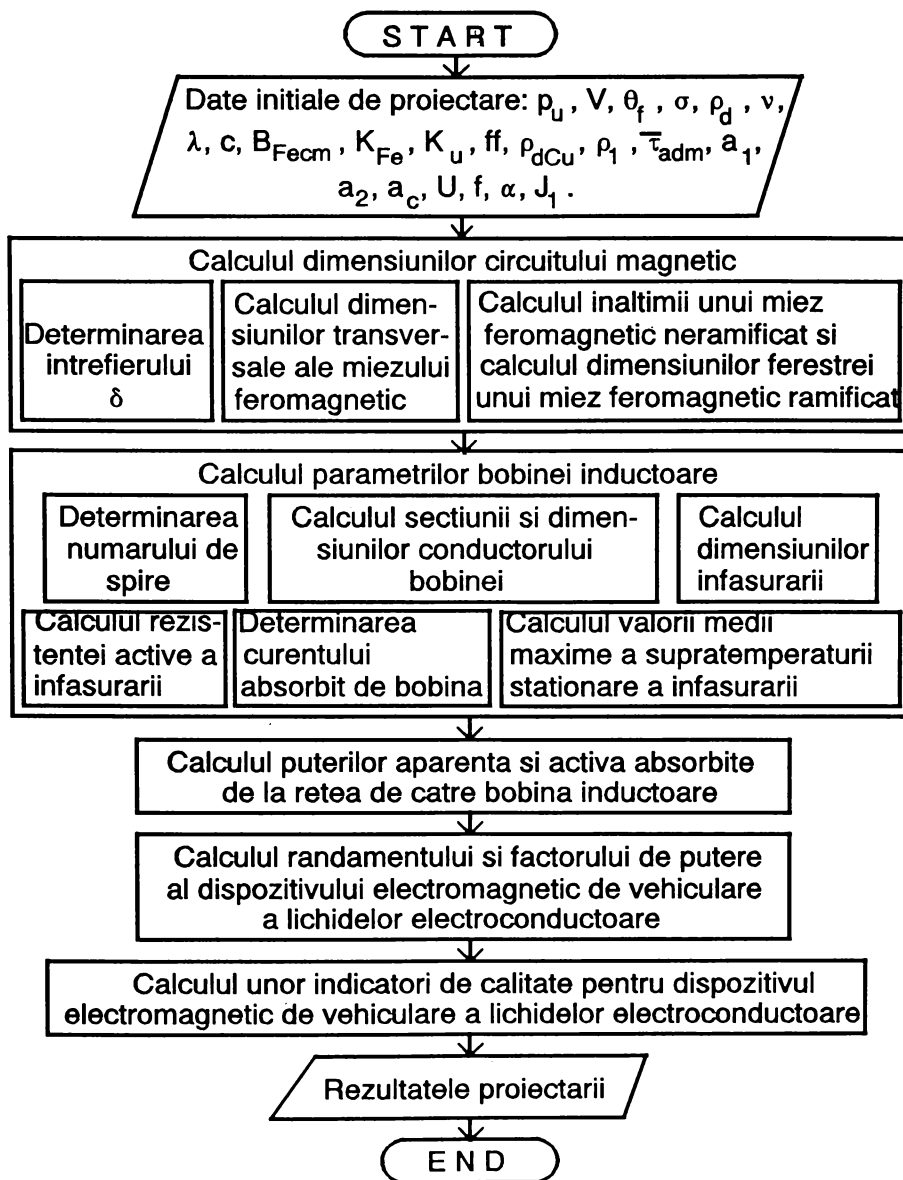


Fig.3.7. Organigrama algoritmului de proiectare a unui dispozitiv electromagnetic de vehiculare a lichidelor electroconductoare.

tehnologie de împachetare mult mai dificilă, umplerea cercului cu diametrul D_{Fe} (vezi fig.3.8.) neputându-se face perfect nici cu un număr mare de trepte, dar tehnologia de fabricație a bobinelor rotunde ce se montează pe coloana centrală a acestora este mai ușoară.

Dimensiunile geometrice ale principalelor tipuri constructive de miezuri feromagnetice din componența dispozitivelor electromagnetice de vehiculare a lichidelor electroconductoare sunt prezentate în fig.3.8.

În continuare se stabilește grosimea peretilor (din material izolator sau conductor) canalului de curgere în limitele [39, 84, 147]:

$$a_1 = (0,8 - 2) \cdot 10^{-3} \quad [m] \quad (3.42)$$

Se alege apoi grosimea izolației termice cu relația [39]:

$$a_2 = \frac{\Delta \theta_2}{100} \cdot 10^{-3} \quad [m] \quad (3.43)$$

în care $\Delta \theta_2$ reprezintă căderea de temperatură pe izolație în °C. Această alegere se poate face numai după impunerea regimului termic al dispozitivului electromagnetic. Se va considera, în majoritatea cazurilor, pentru bobina inductoare, o răcire forțată cu aer și o execuție în clasa de izolație H.

Pe baza acestor date se poate calcula valoarea întrefierului circuitului magnetic (vezi fig.3.2):

$$\delta = 2a_1 + 2a_2 + a_c \quad [m] \quad (3.44)$$

unde a_c este grosimea zonei de pompare ocupată de lichidul electroconductor, luând valori cuprinse în intervalul $(3 \cdot 10^{-3} \dots 12 \cdot 10^{-3}) m$.

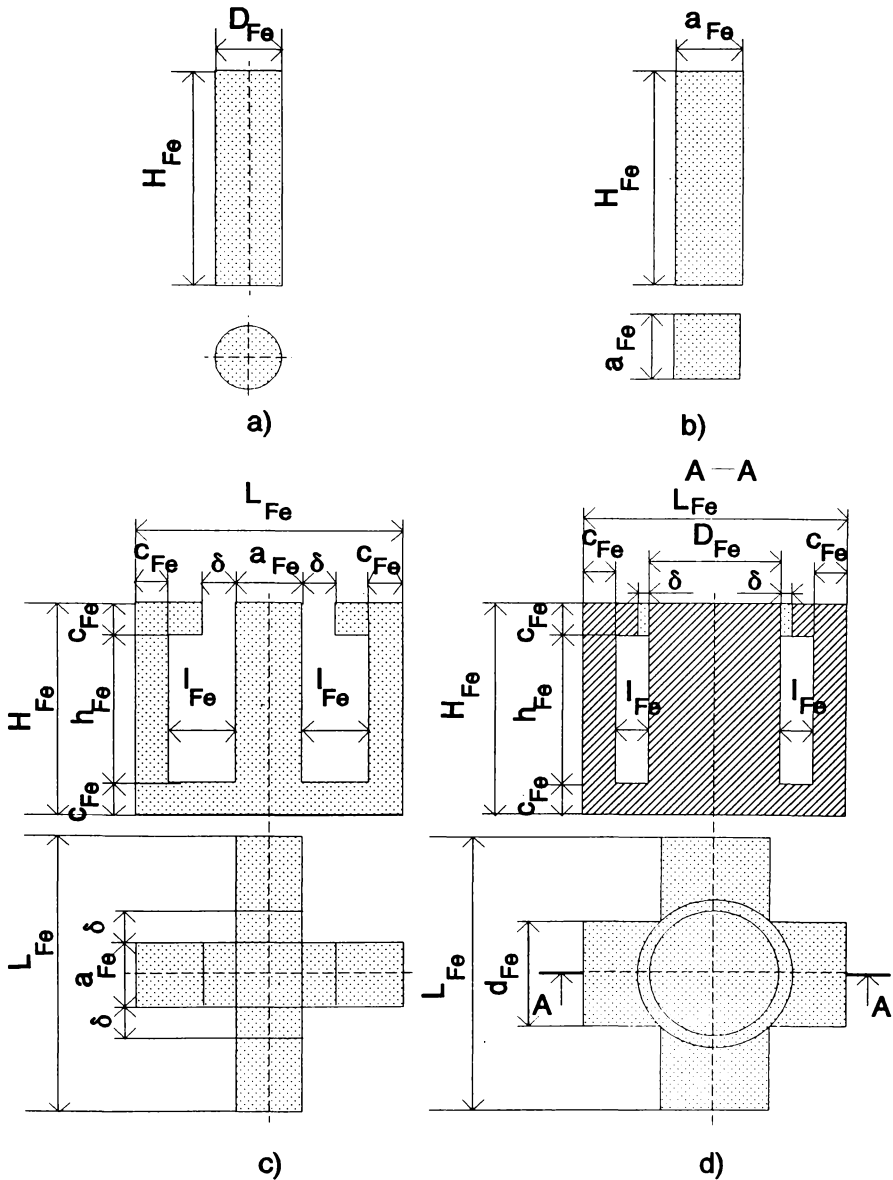


Fig.3.8. Dimensiunile miezurilor magnetice utilizate în construcția pompei magnetohidrodinamice de repulsie.

3.4.2. Calculul dimensiunilor transversale ale miezului feromagnetic

Determinarea secțiunii transversale a coloanei centrale a miezului feromagnetic se face pornind de la relația de definiție a debitului masic sau volumic al pompei magnetohidrodinamice de repulsie.

♦ Pentru miezuri feromagnetice având coloana centrală de secțiune transversală circulară (fig.3.8.a. și d) vom avea:

Debitul volumic V este:

$$V = S_t \cdot v_{med} = v_{med} \cdot \left(\frac{\pi \cdot D_c^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_c^2}{4} \right) \quad (3.45)$$

în care: S_t și v_{med} au semnificația prezentată anterior (vezi relația 3.1), D_c este diametrul exterior al zonei de pompare ocupată de lichidul electroconductor, iar d_c este diametrul interior al zonei de pompare (vezi fig.2.3.).

Deoarece,

$$D_c = d_c + 2 \cdot a_c = (D_{Fe} + 2a_1 + 2a_2) + 2a_c \quad (3.46)$$

cu a_c reprezentând grosimea zonei de pompare, D_{Fe} fiind diametrul secțiunii transversale circulare a coloanei centrale a miezului feromagnetic, iar a_1 și a_2 având semnificațiile precizate anterior, se obține succesiv:

$$\begin{aligned} V &= \frac{\pi \cdot v_{med}}{4} \left[(d_c + 2a_c)^2 - d_c^2 \right] = \pi \cdot v_{med} \cdot (a_c^2 + a_c \cdot d_c) = \\ &= \pi \cdot v_{med} \cdot a_c \cdot (D_{Fe} + 2a_1 + 2a_2 + a_c) \end{aligned} \quad (3.47)$$

Rezultă pentru calculul diametrului secțiunii transversale a coloanei centrale a miezului feromagnetic relația:

$$D_{Fe} = \frac{V}{\pi \cdot v_{med} \cdot a_c} - 2a_1 - 2a_2 - a_c \quad [m] , \quad (3.48)$$

în care pentru viteza medie a lichidului electroconductor se admite o valoare cuprinsă în intervalul:

$$v_{med} = (0, 2 \dots 3) \text{ m/s} \quad (3.49)$$

în funcție de destinația pompei magnetohidrodinamice de repulsie.

♦ Pentru miezuri feromagnetice având coloana centrală de secțiune transversală pătrată (fig.3.8.b. și c) rezultă succesiv:

$$\begin{aligned} V &= v_{med} \cdot S_t = v_{med} \cdot (L_c^2 - l_c^2) = v_{med} \cdot [(l_c + 2a_c)^2 - l_c^2] = \\ &= v_{med} \cdot (4a_c^2 + 4a_c \cdot l_c) = 4 \cdot v_{med} \cdot a_c (a_c + l_c) = \\ &= 4 \cdot v_{med} \cdot a_c \cdot (a_c + a_{Fe} + 2a_1 + 2a_2) \end{aligned} \quad (3.50)$$

unde L_c este lungimea exterioară a zonei de pompare, l_c este lungimea interioară a zonei de pompare, iar a_{Fe} este lungimea laturii secțiunii transversale a miezului feromagnetic central.

Relația de calcul pentru dimensiunea a_{Fe} a secțiunii transversale a miezului feromagnetic va fi:

$$a_{Fe} = \frac{V}{4 \cdot v_{med} \cdot a_c} - 2a_1 - 2a_2 - a_c \quad [m] \quad (3.51)$$

Calculul secțiunii transversale a coloanei centrale a miezului feromagnetic se va efectua pe baza următoarelor relații:

♦ pentru secțiunea coloanei, în trepte (fig.3.8.a și d):

$$S_c = K_{Fe} \cdot K_g \cdot \frac{\pi \cdot D_{Fe}^2}{4} \quad [m^2] \quad (3.52)$$

unde: K_{Fe} este coeficientul de împachetare a miezului, iar K_g este coeficientul geometric de umplere a cercului cu diametrul D_{Fe} .

Pentru tole de 0,35 mm, din tablă silicioasă laminată la rece cu cristale orientate și izolate cu carlit, $K_{Fe} = 0,94 \dots 0,96, .$

Coeficientul K_g depinde direct de numărul de trepte ale miezului coloanei, de modul de strângere al acesteia și de lărgimea eventualelor canale de răcire prevăzute în miez. În ANEXA 6 sunt date orientativ valorile lui K_g în funcție de diametrul D_{Fe} și numărul de trepte ale miezului coloanei n_{tr} .

♦ pentru secțiunea coloanei pătrate (fig.3.8.b. și c.):

$$S_c = K_{Fe} \cdot a_{Fe}^2 \quad [m^2] \quad (3.53)$$

Determinarea secțiunii transversale a jugurilor miezului feromagnetic se face cu ajutorul relației:

$$S_j = \frac{S_c}{4} \quad [m^2] \quad (3.54)$$

Dimensiunile geometrice ale secțiunii transversale a jugurilor miezului feromagnetic se notează cu c_{Fe} și d_{Fe} și se stabilesc astfel:

♦ pentru miezul feromagnetic din fig.3.8.c.:

$$d_{Fe} = a_{Fe} \quad [m] \quad (3.55)$$

$$c_{Fe} = \frac{S_j}{K_{Fe} \cdot a_{Fe}} \quad [m] \quad (3.56)$$

♦ pentru miezul feromagnetic din fig.3.8.d.:

$$d_{Fe} = \sqrt{2} \cdot \left(\frac{D_{Fe}}{2} + \delta \right) = \sqrt{2} \cdot \left(\frac{D_{Fe}}{2} + a_c + 2a_1 + 2a_2 \right) \quad [m] \quad (3.57)$$

$$C_{Fe} = \frac{S_j}{K_{Fe} \cdot d_{Fe}} \quad [m] \quad (3.58)$$

Precizăm că D_{Fe} trebuie să fie neapărat mai mare decât d_{Fe} .

3.4.3. Calculul înălțimii unui miez feromagnetic neramificat și calculul dimensiunilor ferestrei unui miez feromagnetic ramificat

A. Pentru determinarea dimensiunilor ferestrei unui miez feromagnetic ramificat (vezi fig.3.8.c. și d.), al unui dispozitiv electromagnetic destinat antrenării lichidelor electroconductoare se scrie relația:

$$Q_{Fe} = l_{Fe} \cdot h_{Fe} = \frac{N_1 \cdot S_{tCu}}{K_u} = \frac{\theta_1}{K_u \cdot J_1} \quad (3.59)$$

unde: Q_{Fe} este secțiunea ferestrei miezului feromagnetic;
 l_{Fe} - lățimea ferestrei miezului feromagnetic;
 h_{Fe} - înălțimea ferestrei miezului feromagnetic;
 θ_1 - solenația totală;
 S_{tCu} - secțiunea transversală a conductorului neizolat din cupru;
 J_1 - densitatea de curent din înfășurare în regim permanent;

N_1 - numărul de spire ale bobinei inductoare;

K_u - coeficientul de umplere al înfășurării.

Solenajia necesară θ_1 pe care trebuie să o dezvolte bobina de curent alternativ se va calcula aplicând pe un contur legat de o linie de flux magnetic util legea circuitului magnetic:

$$\begin{aligned}\theta_1 &= \oint_{\Gamma} \vec{H} \cdot d\vec{l} = H_{Fem} \cdot (l_{tFe} + \delta_{Fe}) + H_m \cdot \delta + H_{om} \cdot l_o = \\ &= U_{mFe} + U_{m\delta} + U_{mo}\end{aligned}\quad (3.60)$$

cu notațiile: H_{om} - intensitatea maximă a câmpului magnetic în zonele de aer din afara întrefierului de lucru;

H_{Fem} - intensitatea maximă a câmpului magnetic în fier;

H_m - intensitatea maximă a câmpului magnetic în întrefierul de lucru;

l_{tFe} - lungimea totală a porțiunilor de fier ale circuitului magnetic;

δ_{Fe} - întrefier fictiv prin care se ține seama de solenajia necesară compensării energiei disipate ca urmare a pierderilor în fier prin histerezis și curenți turbionari și a pierderilor din masa de lichid electroconductor ($\delta_{Fe} = 0,5 \dots 1 \text{ mm}$);

l_o - lungimea porțiunilor de aer ale circuitului magnetic;

δ - lungimea întrefierului de lucru al circuitului magnetic;

U_{mFe} - căderea de tensiune magnetică din fierul circuitului magnetic;

U_{mo} - căderea de tensiune magnetică care revine porțiunilor de aer;

$U_{m\delta}$ - căderea de tensiune magnetică din întrefier.

Dependența dintre U_{mFe} , U_{mo} și $U_{m\delta}$ este neliniară datorită neliniarității circuitului magnetic. De regulă, având în vedere că U_{mFe} are o pondere în solenația totală θ_1 de (10...20)%, iar U_{mo} reprezintă (5...15)% din θ_1 , de U_{mFe} și U_{mo} se va ține seama printr-un coeficient de majorare K_m a lui $U_{m\delta}$.

Deci tensiunea magnetomotoare sau solenația totală are valoarea:

$$\theta_1 = K_m \cdot U_{m\delta} = K_m \cdot \frac{B_m \cdot \delta}{\mu_0} \quad (3.61)$$

Definind factorul de formă ff al dispozitivului electro-magnetic de vehiculare a lichidelor electroconductoare prin raportul dintre lungimea sa maximă și înălțimea sa maximă, rezultă următoarele relații de legătură între înălțimea h_{Fe} și lățimea l_{Fe} a ferestrei miezului feromagnetic:

$$ff = \frac{a_{Fe} + 2 \cdot l_{Fe} + 2 \cdot C_{Fe}}{h_{Fe} + 2 \cdot C_{Fe}} \quad (3.62)$$

dacă miezul feromagnetic are forma și dimensiunile din fig.3.8.c și respectiv

$$ff = \frac{D_{Fe} + 2 \cdot l_{Fe} + 2 \cdot C_{Fe}}{h_{Fe} + 2 \cdot C_{Fe}} \quad (3.63)$$

dacă miezul feromagnetic are forma și dimensiunile din fig.3.8.d.

În baza relațiilor (3.59), (3.61) și (3.62) respectiv (3.63) se obțin ecuațiile:

$$ff \cdot h_{Fe}^2 + [2 \cdot C_{Fe} \cdot (ff - 1) - a_{Fe}] \cdot h_{Fe} - \frac{2 \cdot K_m \cdot B_m \cdot \delta}{K_u \cdot J_1 \cdot \mu_0} = 0 \quad (3.64)$$

și respectiv:

$$ff \cdot h_{Fe}^2 + [2 \cdot C_{Fe} \cdot (ff - 1) - D_{Fe}] \cdot h_{Fe} - \frac{2 \cdot K_m \cdot B_m \cdot \delta}{K_u \cdot J_1 \cdot \mu_0} = 0 \quad (3.65)$$

prin a căror rezolvare rezultă înălțimea h_{Fe} a ferestrei miezului feromagnetic.

Lățimea l_{Fe} a ferestrei miezului feromagnetic se va determina definitiv după dimensionarea înfășurărilor. Preliminar însă, ea poate fi calculată după ce s-a determinat h_{Fe} cu relația (3.62) pentru miezul din fig.3.8.c., sau cu relația (3.63) pentru miezul din fig.3.8.d.

Mărimile care intervin în relațiile de calcul ale dimensiunilor l_{Fe} și h_{Fe} , corespunzătoare ferestrei miezului feromagnetic sunt:

◆ Coeficientul de umplere al înfășurării K_u , pentru care se vor admite valorile uzuale [39, 89, 54]:

$$K_u = 0,5 \dots 0,6$$

◆ Densitatea de curent din înfășurare J_1 , care se va adopta în funcție de clasa de izolație a înfășurării și de modul de răcire al acesteia. Astfel, pentru izolație în clasa H de stabilitate termică și considerând răcirea înfășurării prin ventilație forțată cu aer, pot fi avute în vedere valori în limitele $J_1 = (2 \dots 5) \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$.

♦ Inducția magnetică maximă din întrefier B_m , pentru care se va admite o valoare obținută prin rezolvarea următoarei ecuații:

$$P_u = P_e - P_f \quad (3.66)$$

în care: P_u este presiunea utilă a pompei magnetohidrodinamice de repulsie impusă de beneficiar, P_e este presiunea electromagnetică determinată de forțele electromagnetice în zona de pompare, iar P_f sunt pierderile de presiune în canalul de curgere a lichidului electroconductor.

Apreciind că pierderile de presiune în canalul pompei magnetohidrodinamice de repulsie reprezintă între 10% și 30% din presiunea electromagnetică [143, 147, 39] ecuația (3.66) poate fi pusă sub forma:

$$P_u = \left(9 \dots \frac{7}{3}\right) \cdot P_f \quad (3.67)$$

Pierderile de presiune în canalul de curgere a lichidului electroconductor se determină cu relația uzuală [88, 39, 43]:

$$P_f = \xi \cdot \frac{\rho_d \cdot V_{med}^2 \cdot S_c}{2 \cdot D_H} \quad (3.68)$$

unde: V_{med} este viteza medie a lichidului electroconductor;
 ρ_d - densitatea lichidului electroconductor;
 S_c - lungimea canalului de curgere a lichidului electroconductor (se poate considera $S_c = C_{Fe}$);
 ξ - coeficientul pierderilor de sarcină liniare;
 D_H - diametrul hidraulic al secțiunii transversale a canalului de curgere (de patru ori secțiunea transversală a canalului de curgere împărțită la perimetrul udat de lichidul electroconductor);

Dacă curgerea este laminară, situație posibilă numai pentru

$$Re < 215 \cdot Ha_1 \quad (3.69)$$

unde:

$$Re = \frac{v_{med} \cdot D_H}{\nu} \quad (3.70)$$

este numărul lui Reynolds, iar

$$Ha_1 = B_m \cdot D_H \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_d \cdot \nu}} \quad (3.71)$$

este numărul lui Hartmann modificat, atunci coeficientul pierderilor de sarcină liniare se determină cu relația:

$$\xi = \frac{8}{Re} \cdot \frac{Ha_1^2 \cdot th \frac{Ha_1}{4}}{Ha_1 - 4 \cdot th \frac{Ha_1}{4}} \quad (3.72)$$

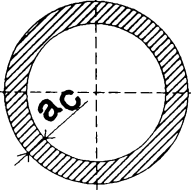
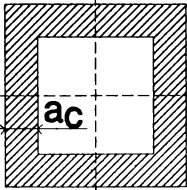
sau, dacă $Ha_1 > 40$, cu relația

$$\xi \approx \frac{8 \cdot Ha_1}{Re} \quad (3.73)$$

Diametrul hidraulic al secțiunii transversale a canalului de curgere a lichidului electroconductor se va calcula cu relațiile din tabelul 3.1., stabilite pe baza fig.2.3.

Tabelul 3.1.

Relații de calcul pentru diametrul hidraulic al secțiunii transversale a unor canale de curgere pentru lichide electroconductoare

 <p>Canal cu secțiunea transversală cuprinsă între 2 cercuri concentrice</p>	 <p>Canal cu secțiunea transversală cuprinsă între 2 pătrate coaxiale</p>
$D_H = \frac{4 \cdot \left(\frac{\pi D_c^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_c^2}{4} \right)}{\pi \cdot D_c + \pi \cdot d_c} = 2a_c$	$D_H = \frac{4(L_c^2 - l_c^2)}{4 \cdot L_c + 4 \cdot l_c} = 2 \cdot a_c$

Deoarece numărul lui Hartmann are în acest caz expresia [84, 39]:

$$Ha = \frac{B_m \cdot a_c}{2} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_d \cdot \nu}} \quad (3.74)$$

rezultă succesiv următoarele relații:

$$\frac{Ha_1}{Ha} = \frac{B_m \cdot D_H \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_d \cdot \nu}}}{\frac{B_m \cdot a_c}{2} \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_d \cdot \nu}}} = \frac{2 \cdot D_H}{a_c} = \frac{2 \cdot 2a_c}{a_c} = 4 \quad (3.75)$$

$$\lambda = \frac{8}{Re} \cdot \frac{Ha_1^2 \cdot th \frac{Ha_1}{4}}{Ha_1 - 4 \cdot th \frac{Ha_1}{4}} = \frac{8}{\frac{v_{med} \cdot 2a_c}{v}} \cdot \frac{(4 \cdot Ha)^2 \cdot th Ha}{4 \cdot Ha - 4 \cdot th Ha} =$$

$$= \frac{16 \cdot v}{v_{med} \cdot a_c} \cdot \frac{Ha^2 \cdot th Ha}{Ha - th Ha} \quad (3.76)$$

$$P_f = \lambda \cdot \frac{\rho_d \cdot v_{med}^2 \cdot S_c}{2 \cdot D_H} = \frac{4 \cdot v \cdot \rho_d \cdot v_{med} \cdot S_c}{a_c^2} \cdot \frac{Ha^2 \cdot th Ha}{Ha - th Ha} \quad (3.77)$$

B. Pentru determinarea înălțimii unui miez feromagnetic neramificat (vezi fig.3.8.a. și b.) din componența unui dispozitiv electromagnetic de vehiculare a lichidelor electroconductoare se va utiliza relația:

$$H_{Fe} = h_{Fe} + 2 \cdot C_{Fe} \quad (3.78)$$

în care:

♦ pentru miezul feromagnetic reprezentat în fig.3.8.b.

$$C_{Fe} = \frac{a_{Fe}}{4} \text{ și } h_{Fe} \text{ este soluția ecuației (3.64), iar}$$

♦ pentru miezul feromagnetic reprezentat în fig.3.8.a.

$$C_{Fe} = \frac{K_g \cdot \pi \cdot D_{Fe}^2}{8 \cdot \sqrt{2} \cdot (D_{Fe} + 2 \cdot \delta)} \text{ și } h_{Fe} \text{ este soluția ecuației (3.65).}$$

3.4.4. Calculul parametrilor bobinei inductoare

Bobinele dispozitivelor electromagnetice ale pompelor magnetohidrodinamice de repulsie se confecționează în majoritatea cazurilor din conductor rotund cu diametrul maxim până la 2 + 2,5 mm sau din conductor profilat (dreptunghiular cu muchiile rotunjite).

Înfășurarea este cu izolație în clasa H, având supratemperatura maximă admisibilă $\bar{\tau}_{adm}$.

Confecționarea bobinei se face prin depănarea conductorului direct pe o carcasă izolantă, carcasă care constituie și izolația față de masă.

După confecționare, înainte de asamblarea pe miez, bobina se impregnează cu lac siliconic, corespunzător clasei de izolație H.

3.4.4.1. Stabilirea numărului de spire al bobinei inductoare

Determinarea numărului de spire ale bobinei dispozitivului electromagnetic de antrenare a lichidelor electroconductoare se face cu ajutorul relației:

$$N_1 = \frac{E_1}{e_1} = \text{număr întreg} \quad (3.79)$$

în care: E_1 reprezintă tensiunea electromotoare indusă în toată înfășurarea, iar e_1 este tensiunea electromotoare indusă într-o spirală și se obține cu relația:

$$e_1 = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot \Phi_{Fecm} = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot B_{Fecm} \cdot S_c \quad [V] \quad (3.80)$$

unde S_c este secțiunea exactă a coloanei centrale a miezului feromagnetic, f este frecvența tensiunii de alimentare, Φ_{Fecm} este amplitudinea fluxului magnetic prin coloana centrală a miezului feromagnetic, iar B_{Fecm} este valoarea maximă a inducției magnetice în coloana centrală a miezului feromagnetic.

Deoarece în cazul dispozitivelor electromagnetice de vehiculare a lichidelor electroconductoare, tensiunea electromotoare indusă în înfășurare este aproximativ egală cu tensiunea nominală a înfășurării ($E_1 \approx U$), iar amplitudinea inducției magnetice în coloana centrală a miezului feromagnetic

se consideră ca fiind $B_{Fecm} = (1, 2, \dots, 1, 4) T$, în baza relațiilor (3.79) și (3.80) rezultă:

$$N_1 \approx \frac{U}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot B_{Fecm} \cdot S_c} \quad (3.81)$$

3.4.4.2. Calculul secțiunii și dimensiunilor conductorului bobinei.

Aria secțiunii transversale a conductorului neizolat din cupru rezultă din relația:

$$S_{tcu} = \frac{K_m \cdot B_m \cdot \delta}{\mu_0 \cdot N_1 \cdot J_1} \quad (3.82)$$

Termenii conținuți în această relație au fost definiți anterior (vezi relația (3.59)).

Având în vedere valoarea obținută pentru aria secțiunii conductorului neizolat, se stabilește dimensiunea definitivă a conductorului din STAS-ul de conductoare.

Astfel, pentru valorile ariei secțiunii S_{tcu} mai mici ca 6 mm^2 se alege din STAS 685-74 un conductor rotund, izolat corespunzător clasei de izolație H.

Dacă valoarea ariei secțiunii S_{tcu} este mai mare ca 6 mm^2 , atunci din STAS 2873/1-86 se alege un conductor dreptunghiular, izolat de asemenea corespunzător clasei de izolație H.

Se stabilesc, deci, definitiv, următoarele dimensiuni:

♦ pentru conductorul rotund: diametrul conductorului neizolat d_{cu} , diametrul conductorului izolat d_{cuiz} și aria secțiunii transversale a conductorului neizolat $s_{tcu} \geq S_{tcu}$ (se alege din STAS valoarea superioară cea mai apropiată de S_{tcu});

♦ pentru conductorul dreptunghiular (profilat): dimensiunile corespunzătoare conductorului neizolat și izolat pe grosimea bobinei a_{cu} și respectiv a_{cuiz} , dimensiunile corespunzătoare

conductorului neizolat și izolat pe înălțimea bobinei b_{Cu} și respectiv b_{Cuiz} și aria secțiunii transversale a conductorului neizolat S_{tCu} .

3.4.4.3. Calculul dimensiunilor înfășurării

Pentru dimensionarea înfășurării este necesară parcurgerea următoarelor etape:

- ♦ Se determină înălțimea bobinei H_B (vezi fig.3.9.):

$$H_B = h_{Fe} - z_{mf} - t_{mf} \quad [m] \quad (3.83)$$

în care: t_{mf} este distanța dintre bobină și jugul superior al miezului feromagnetic, h_{Fe} este înălțimea calculată a ferestrei miezului feromagnetic, iar z_{mf} este distanța dintre bobină și jugul inferior al miezului feromagnetic.

Dimensiunile t_{mf} și z_{mf} cuprind și grosimea carcasei și jocul (sus și jos) de asamblare, având valorile $t_{mf} = (6+8) \text{ mm}$ și $z_{mf} = 3 \text{ mm}$.

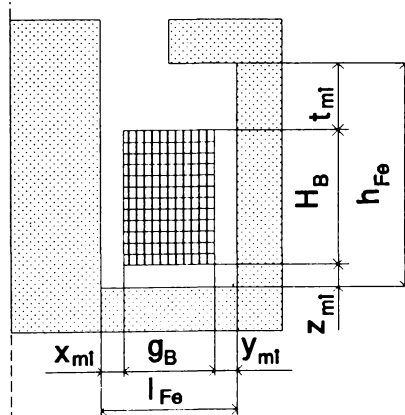


Fig.3.9. Dimensiunile înfășurării unui dispozitiv electromagnetice de vehiculare a lichidelor electroconductive.

♦ Se determină numărul de spire pe un strat al bobinei, n_{1r} respectiv n_{1p} :

- pentru conductor rotund:

$$n_{1r} = \frac{H_B}{d_{CuiZ}} = nr. \text{întreg}, \quad (3.84)$$

- pentru conductor profilat:

$$n_{1p} = \frac{H_B}{b_{CuiZ}} = nr. \text{întreg}, \quad (3.85)$$

♦ Se determină numărul de straturi ale bobinei, n_{sr} respectiv n_{sp} :

- pentru conductor rotund:

$$n_{sr} = \frac{N_1}{n_{1r}} = nr. \text{întreg}, \quad (3.86)$$

- pentru conductor profilat:

$$n_{sp} = \frac{N_1}{n_{1p}} = nr. \text{întreg}, \quad (3.87)$$

valori care se rotunjesc la numărul imediat superior.

♦ Se calculează grosimea bobinei:

- pentru conductor rotund:

$$g_{Br} = n_{sr} \cdot d_{CuiZ} + n_{ca} \cdot l_{ca} + (n_{sr} - n_{ca} - 1) \cdot \delta_{iz} \quad [m] \quad (3.88)$$

- pentru conductor profilat:

$$g_{Bp} = n_{sp} \cdot a_{CuiZ} + n_{ca} \cdot l_{ca} + (n_{sp} - n_{ca} - 1) \cdot \delta_{iz} \quad [m] \quad (3.89)$$

unde: g_{Br} , g_{Bp} , n_{sr} , n_{sp} , a_{CuiZ} , d_{CuiZ} au semnificațiile prezentate

anterior, l_{ca} reprezintă lățimea canalelor axiale de răcire cu valori între $(3, \dots, 8)$ mm, δ_{iz} este grosimea izolației dintre straturi din pânză de sticlă de $(0, 2, \dots, 0, 3)$ mm, iar n_{ca} este numărul canalelor axiale alese astfel încât fiecare strat să fie în contact cu agentul de răcire cel puțin pe una din părți.

♦ Se determină lățimea definitivă a ferestrei miezului feromagnetic:

- pentru conductor rotund:

$$l_{Fer} = g_{Br} + x_{mf} + y_{mf} \quad [m] \quad (3.90)$$

- pentru conductor profilat:

$$l_{Fep} = g_{Bp} + x_{mf} + y_{mf} \quad [m] \quad (3.91)$$

în care $x_{mf} = (3, \dots, 4)$ mm este o dimensiune ce include grosimea carcasei bobinei de cca 2 mm și jocul (pe o parte) între interiorul carcasei și miezul feromagnetic, iar $y_{mf} = (3, \dots, 5)$ mm este distanța rezultată, după asamblarea bobinei, între suprafața laterală a bobinei și miezul feromagnetic.

♦ Se calculează coeficientul real de umplere al înfășurării:

- pentru conductor rotund:

$$K_{ru} = \frac{S_{tCu} \cdot N_1}{l_{Fer} \cdot h_{Fe}} \quad (3.92.a)$$

- pentru conductor dreptunghiular (profilat):

$$K_{up} = \frac{S_{tCu} \cdot N_1}{l_{Fep} \cdot h_{Fe}} \quad (3.92.b)$$

3.4.4.4. Calculul rezistenței active a înfășurării

♦ Se determină lungimea medie a spirei înfășurării cu una din relațiile:

- pentru miez cu secțiunea transversală dreptunghiulară și conductor de bobinaj rotund:

$$l_{mdr} \approx 4 \cdot (a_{Fe} + 2 \cdot x_{mf} + g_{Br}) \quad [m] \quad (3.93)$$

- pentru miez cu secțiunea transversală dreptunghiulară și conductor de bobinaj profilat:

$$l_{mdp} \approx 4 \cdot (a_{Fe} + 2 \cdot x_{mf} + g_{Bp}) \quad [m] \quad (3.94)$$

- pentru miez în trepte și conductor de bobinaj rotund:

$$l_{mtr} \approx \pi \cdot (D_{Fe} + 2 \cdot x_{mf} + g_{Br}) \quad [m] \quad (3.95)$$

- pentru miez în trepte și conductor de bobinaj profilat:

$$l_{mtp} \approx \pi \cdot (D_{Fe} + 2 \cdot x_{mf} + g_{Bp}) \quad [m] \quad (3.96)$$

♦ Se calculează rezistența activă a înfășurării cu una din relațiile următoare, având în vedere forma constructivă a miezului feromagnetic și a conductorului de bobinaj:

$$R_{1dr} = \rho_{10} \cdot \frac{N \cdot l_{mdr}}{S_{tCu}} \quad [\Omega] \quad (3.97)$$

$$R_{1dp} = \rho_{10} \cdot \frac{N \cdot l_{mdp}}{S_{tCu}} \quad [\Omega] \quad (3.98)$$

$$R_{1tr} = \rho_{10} \cdot \frac{N \cdot l_{mtr}}{S_{tCu}} \quad [\Omega] \quad (3.99)$$

$$R_{1tp} = \rho_{10} \cdot \frac{N \cdot l_{mtp}}{S_{tCu}} \quad [\Omega] \quad (3.100)$$

în care ρ_{10} reprezintă rezistivitatea materialului conductorului din care este făcută înfășurarea, la temperatura convențională de lucru θ .

3.4.4.5. Calculul valorii medii maxime a supratemperaturii staționare la care trebuie să funcționeze înfășurarea.

Din STAS 553 se cunoaște că supratemperatura maximă admisibilă pentru înfășurarea unui dispozitiv electromagnetic de vehiculare a lichidelor electroconductoare (înfășurare executată din conductor de Cu și materiale izolante conform clasei H de stabilitate termică) este $\bar{\tau}_{adm}=160^{\circ}C$. În procesul de fabricație datorită variabilității inerente a caracteristicilor de material și de execuție, pentru un eșantion de 10 dispozitive electromagnetice de același tip (cu aceleași dimensiuni și caracteristici tehnice) executate din aceleași materiale, cu aceeași tehnologie și în condiții similare, se constată că supratemperatura măsurată are un câmp de variație naturală Δx .

Admitem că variația aleatoare a supratemperaturii determinate experimental este supusă unei legi de repartiție normale (gaussiene) și adoptăm $\Delta x=3\sigma_0$, unde σ_0 este abaterea standard [79].

Se admite, de asemenea, că la un nou dispozitiv electromagnetic executat cu aceeași tehnologie și aceleași materiale riscul de a rebuta înfășurările care depășesc supratemperatura maximă admisibilă $\bar{\tau}_{adm}$ este α_0 .

Din tabelul prezentat în ANEXA 5 pentru riscul de defectare α_0 se obține cuantila Z_{α_0} .

Pe baza acestor date se poate calcula valoarea medie maximă a supratemperaturii staționare $\bar{\tau}_{max}$, la care ar trebui să funcționeze înfășurarea noului dispozitiv electromagnetic de vehiculare a lichidelor electroconductoare, cu ajutorul relației [79]:

$$\bar{\tau}_{\max} = \frac{\bar{\tau}_{adm}}{1 - Z_{\alpha 0} \cdot \frac{\sigma_{\theta}}{\bar{\tau}_{adm}}} \quad (3.101)$$

în care numitorul

$$\frac{1}{1 - Z_{\alpha 0} \cdot \frac{\sigma_{\theta}}{\bar{\tau}_{adm}}} = \gamma_{r\theta} \quad (3.102)$$

reprezintă coeficientul de siguranță operațional pentru înfășurarea dispozitivului electromagnetic de vehiculare a lichidelor electroconductoare.

3.4.4.6. Determinarea curentului absorbit de bobina inductoare

♦ În cazul dispozitivelor electromagnetice, ale pompelor magnetohidrodinamice de repulsie, prevăzute cu miezuri feromagnetice având forma și dimensiunile din fig.3.8.a., pentru determinarea curentului absorbit de bobină se va aplica legea circuitului magnetic pe o curbă închisă legată de o linie de flux magnetic util (vezi curba Γ_2 din fig.3.3.).

Rezultă relația:

$$\begin{aligned} H_{Fecma} (\delta_{Fe} + h_{Fe} + 2 \cdot C_{Fe}) + H_{ma} \cdot C_{Fe} + H_{\alpha ma}^* \cdot (h_{Fe} + C_{Fe} + \delta + D_{Fe}) = \\ = \frac{i_{1ma} \cdot N_1}{g_B \cdot H_B} \cdot H_B \cdot \left(\frac{\delta}{2} - X_{mf} \right) \end{aligned} \quad (3.103)$$

Semnificația mărimilor ce intervin în relația (3.103) a fost prezentată în paragrafele anterioare, cu excepția lui $H_{\sigma ma}^*$, care reprezintă valoarea medie a intensităților maxime ale câmpului magnetic de dispersie în diferite porțiuni (prin aer) ale conturului (Γ_2) considerat.

Valoarea amplitudinii intensității câmpului magnetic în miezul feromagnetic H_{Fecma} se va obține din curba de magnetizare a materialului din care e confecționat miezul, pentru valoarea lui B_{Fecma} .

Intensitatea maximă a câmpului magnetic în masa de lichid electroconductor va fi dată de relația:

$$H_{ma} = \frac{B_{ma}}{\mu_0} \quad , \quad (3.104)$$

iar mărimea $H_{\sigma ma}^*$ se va obține cu relația:

$$H_{\sigma ma}^* \approx \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B_{Fecma} + B_{ma}}{2} \quad (3.105)$$

Numărul de spire al bobinei inductoare N_1 este cel obținut cu relația (3.81), iar δ_{Fe} , h_{Fe} , C_{Fe} , δ , D_{Fe} , g_B , H_B și x_{mf} au valorile deja calculate în paragrafele precedente.

Din relația (3.103) rezultă următoarea expresie de calcul a valorii efective a curentului absorbit de bobina inductoare:

$$I_{1a} = \frac{g_B}{\sqrt{2} \cdot N_1 \cdot \left(\frac{\delta}{2} - x_{mf} \right)} \cdot \left[H_{Fecma} \cdot (\delta_{Fe} + h_{Fe} + 2 \cdot C_{Fe}) + \right. \\ \left. + H_{ma} \cdot C_{Fe} + H_{\sigma ma}^* \cdot (h_{Fe} + C_{Fe} + \delta + D_{Fe}) \right] \quad (3.106)$$

◆ Dacă dispozitivele electromagnetice de antrenare a lichidelor electroconductoare au în componența lor miezuri feromagnetice cu forma și dimensiunile din fig.3.8.b., atunci calculul valorii efective a curentului absorbit de bobina inductoare se va face cu relația:

$$I_{1b} = \frac{g_B}{\sqrt{2} \cdot N_1 \cdot \left(\frac{\delta}{2} - x_{mf}\right)} \cdot \left[H_{Fecmb} \cdot (\delta_{Fe} + h_{Fe} + 2 \cdot c_{Fe}) + \right. \\ \left. + H_{mb} \cdot c_{Fe} + H_{omb}^* \cdot (h_{Fe} + c_{Fe} + \delta + a_{Fe}) \right] \quad (3.107)$$

similară cu relația (3.106) în care dimensiunea D_{Fe} s-a înlocuit cu dimensiunea a_{Fe} , iar indicele "a" s-a înlocuit cu indicele "b".

◆ Dacă dispozitivele electromagnetice ale pompelor magneto-hidrodinamice de repulsie, sunt prevăzute cu miezuri feromagnetice având forma și dimensiunile din fig.3.8.c., atunci curentul din bobina inductoare se determină cu relația [48]:

$$I_{1c} = \frac{\Phi_{Fecmc} \cdot |Z_{ec}|}{\sqrt{2} \cdot N_1} \quad (3.108)$$

unde: Φ_{Fecmc} este fluxul magnetic maxim prin coloana centrală a miezului feromagnetic, $|Z_{ec}|$ este modulul impedanței magnetice echivalente a circuitului magnetic al pompei magnetohidrodinamice de repulsie, iar N_1 este numărul de spire al bobinei inductoare.

Impedanța magnetică echivalentă se obține pe baza schemei electrice echivalente a circuitului magnetic reprezentată în fig.3.10.a.

Pentru alcătuirea schemei electrice echivalente, miezul pe care este dispusă înfășurarea se va împărți în cel mult două părți; numai în cazul în care inducția magnetică are valori mari (adică atunci când punctul de funcționare este situat dincolo de

cotul curbei de magnetizare a materialului) este indicată împărțirea miezului feromagnetic, pe care este situată bobina, în mai multe porțiuni.

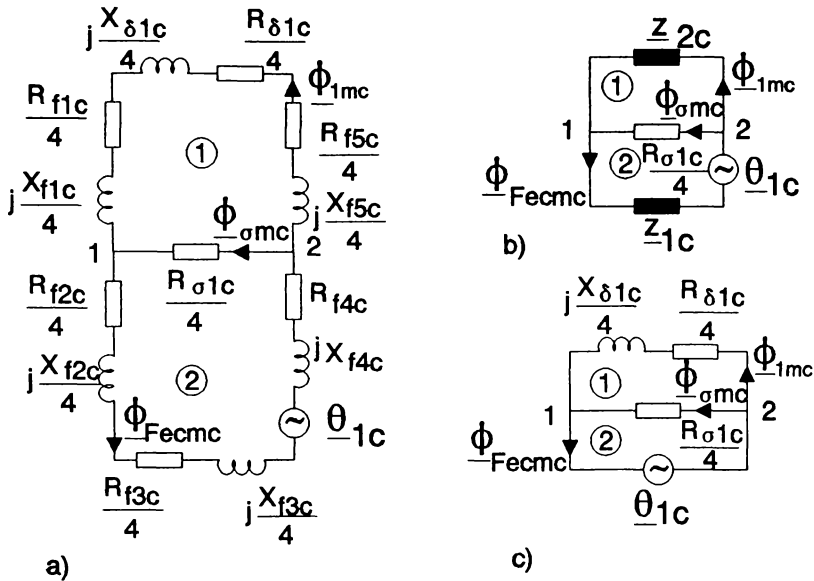


Fig.3.10. Scheme electrice echivalente ale circuitului magnetic de forma și dimensiunile din fig.3.8.c. (X_i -reactanțe magnetice; R_i -reluctanțe magnetice; Z_i -impedanțe magnetice).

În funcție de impedanțele magnetice, schema electrică echivalentă a circuitului magnetic capătă aspectul din fig.3.10.b., unde s-au notat:

$$Z_{1c} = \frac{R_{f2c}}{4} + \frac{R_{f3c}}{4} + R_{f4c} + j \cdot \left(\frac{X_{f2c}}{4} + \frac{X_{f3c}}{4} + X_{f4c} \right) \quad (3.109)$$

$$Z_{2c} = \frac{R_{f1c}}{4} + \frac{R_{f5c}}{4} + \frac{R_{\delta 1c}}{4} + j \cdot \left(\frac{X_{f1c}}{4} + \frac{X_{f5c}}{4} + \frac{X_{\delta 1c}}{4} \right) \quad (3.110)$$

Pe baza fig.3.10.b. impedanța magnetică echivalentă a circuitului magnetic este:

$$Z_{ec} = Z_{1c} + \frac{Z_{2c} \cdot \frac{R_{\sigma 1c}}{4}}{Z_{2c} + \frac{R_{\sigma 1c}}{4}} \quad (3.111)$$

Reluctanțele și reactanțele magnetice se calculează considerând lungimea medie a liniilor de câmp magnetic.

Fluxurile în diversele porțiuni ale circuitului magnetic se obțin, în funcție de fluxul prin coloana centrală a miezului feromagnetic, neglijând în primă aproximație reluctanțele și reactanțele magnetice ale fierului față de reluctanța în aer și reluctanța și reactanța în lichidul electroconductor. Schema electrică echivalentă a circuitului magnetic se prezintă, în acest caz, ca în fig.3.10.c.

Calculul efectiv al reluctanțelor și reactanțelor magnetice ce intervin în relațiile (3.109), (3.110) și (3.111) este prezentat în ANEXA 7.A.

♦ În cazul dispozitivelor electromagnetice destinate antrenării lichidelor electroconductoare și prevăzute cu miezuri feromagnetice de forma și dimensiunile din fig.3.8.d., calculul valorii efective a curentului absorbit de bobina inductoare se va face cu relația:

$$I_{1d} = \frac{\Phi_{Fecmd} \cdot |Z_{ed}|}{\sqrt{2} \cdot N_1} \quad (3.112)$$

similară cu relația (3.108) în care s-a înlocuit indicele "c" (care desemna varianta constructivă din fig.3.8.c) cu indicele "d" (ce desemnează varianta constructivă din fig.3.8.d.).

Impedanța magnetică echivalentă Z_{ed} se va determina pe baza schemei electrice echivalente a circuitului magnetic al pompei magnetohidrodinamice de repulsie, reprezentată în fig 3.11.a.

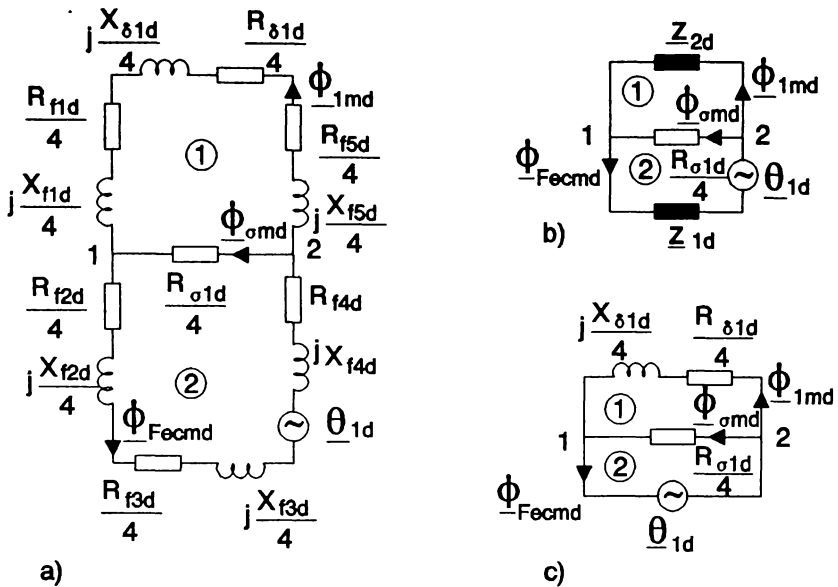


Fig.3.11. Scheme electrice echivalente ale circuitului magnetic de forma și dimensiunile din fig.3.8.d. (X_i -reactanțe magnetice; R_i -reluctanțe magnetice; Z_i -impedanțe magnetice).

Calculul impedanței magnetice Z_{ed} se va desfășura în mod analog calculului impedanței magnetice Z_{ec} , utilizându-se relațiile prezentate în ANEXA 7.B.

3.4.5. Calculul puterilor aparentă și activă absorbite de către bobina dispozitivului electromagnetic de vehiculare a lichidelor electroconductoare

Puterea aparentă S absorbită de la rețea de către bobina inductoare a dispozitivului electromagnetic destinat antrenării lichidelor electroconductoare se determină cu relația:

$$S = U \cdot I_1 \quad (3.113)$$

unde: U este tensiunea de alimentare de la bornele bobinei inductoare, iar I_1 este valoarea efectivă a curentului ce străbate bobina în regim normal de funcționare.

Puterea activă absorbită de către bobina inductoare se va putea calcula, în general, cu relația:

$$P = R_1 \cdot I_1^2 + P_{Fe} + P_e \quad (3.114)$$

în care: R_1 este rezistența activă a înfășurării obținută cu una din relațiile (3.97)...(3.100), P_{Fe} sunt pierderile de energie activă din fier prin fenomenul de histerezis și prin curenți turbionari, iar P_e reprezintă puterea electromagnetică activă în lichidul electroconductor (indus).

Pierderile de energie activă din fier P_{Fe} sunt date de relațiile:

- pentru miezul feromagnetic din fig.3.8.a.:

$$P_{Fea} = P_{fa} \cdot \rho_{dFe} \cdot K_{Fe} \cdot \frac{\pi \cdot D_{Fe}^2}{4} \cdot (h_{Fe} + 2 \cdot C_{Fe}) \quad (3.115)$$

unde pierderile specifice în fier P_{fa} rezultă din curba din ANEXA-2 funcție de inducția B_{Fecma} ;

- pentru miezul feromagnetic din fig.3.8.b.:

$$P_{Feb} = P_{fb} \cdot \rho_{dFe} \cdot K_{Fe} \cdot a_{Fe}^2 \cdot (h_{Fe} + 2 \cdot C_{Fe}) \quad (3.116)$$

unde pierderile specifice în fier P_{fb} se obțin în funcție de B_{Fecmb} (vezi ANEXA-2);

- pentru miezul feromagnetic din fig.3.8.c.:

$$\begin{aligned}
P_{Fec} = & P_{f1c} \cdot \rho_{dFe} \cdot K_{Fe} \cdot a_{Fe} \cdot C_{Fe} \cdot \left(l_{Fe} - \delta + \frac{3 \cdot C_{Fe}}{2} + \frac{a_{Fe}}{2} \right) + \\
& + P_{f2c} \cdot \rho_{dFe} \cdot K_{Fe} \cdot \left[a_{Fe} \cdot C_{Fe} \cdot \left(h_{Fe} + \frac{3 \cdot C_{Fe}}{2} + l_{Fe} + \frac{a_{Fe}}{2} \right) + a_{Fe}^2 \cdot h_{Fe} \right]
\end{aligned} \quad (3.117)$$

unde $P_{f1c} = f(B_{1mc})$ și $P_{f2c} = f(B_{Fecmc})$ conform ANEXEI-2;

- pentru miezul feromagnetic din fig.3.8.d.:

$$\begin{aligned}
P_{Fed} = & P_{f1d} \cdot \rho_{dFe} \cdot K_{Fe} \cdot d_{Fe} \cdot C_{Fe} \cdot \left(l_{Fe} - \delta + \frac{3 \cdot C_{Fe}}{2} + \frac{D_{Fe}}{2} \right) + \\
& + P_{f2d} \cdot \rho_{dFe} \cdot K_{Fe} \cdot \left[d_{Fe} \cdot C_{Fe} \cdot \left(h_{Fe} + \frac{3 \cdot C_{Fe}}{2} + l_{Fe} + \frac{D_{Fe}}{2} \right) + \frac{\pi \cdot D_{Fe}^2}{4} \cdot h_{Fe} \right]
\end{aligned} \quad (3.118)$$

unde $P_{f1d} = f(B_{1md})$ și $P_{f2d} = f(B_{Fecmd})$ conform ANEXEI-2.

Puterea electromagnetică activă în lichidul electroconductor se compune din puterea mecanică P_m dezvoltată în indusul lichid și puterea disipată prin efect Joule P_J în indusul lichid (am neglijat puterea disipată în pereții canalului de curgere a lichidului electroconductor). Relația de calcul a puterii electromagnetice active în lichidul electroconductor este:

$$P_e = P_m + P_J \quad (3.119)$$

în care puterile P_m și P_J se determină cu relațiile (A2.1) și respectiv (A2.3) prezentate în ANEXA-2.

3.4.6. Calculul randamentului și factorului de putere al dispozitivelor electromagnetice ale pompelor magnetohidrodinamice de repulsie

Randamentul total al dispozitivelor electromagnetice din componența pompelor magnetohidrodinamice de repulsie este rațional să fie definit prin raportul dintre puterea electro-

magnetică activă dezvoltată în indus P_e și puterea activă absorbită de bobina inductoare din rețeaua de alimentare P :

$$\eta = \frac{P_e}{P} \quad (3.120)$$

Factorul de putere $\cos \varphi$ al dispozitivului electromagnetic de antrenare a lichidelor electroconductoare va fi dat de relația:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (3.121)$$

3.4.7. Calculul unor indicatori de calitate pentru dispozitivul electromagnetic de vehiculare a lichidelor electroconductoare proiectat

Acești indicatori servesc la aprecierea calității și eficienței dispozitivului electromagnetic proiectat. Ei pot fi folosiți ca funcție obiectiv (criteriu) într-o ulterioară optimizare a proiectării.

Un prim indicator de calitate este masa M a dispozitivului electromagnetic de vehiculare a lichidelor electroconductoare, care se calculează cu ajutorul relației:

$$M = M_{Cu} + M_{Fe} + M_a \quad (3.122)$$

unde: M_{Cu} este masa cuprului bobinei inductoare;

M_{Fe} - masa fierului circuitului magnetic;

M_a - masa pieselor auxiliare.

Masa cuprului bobinei inductoare se calculează cu relația:

$$M_{Cu} = \rho_{dCu} \cdot S_{tCu} \cdot l_m \cdot N_1 \quad [kg] \quad (3.123)$$

în care: $\rho_{dCu} = 8900 \text{ kg/m}^3$ este densitatea cuprului;

l_m - este lungimea medie a spirei conductorului putând avea una din valorile l_{mdr} , l_{mdp} , l_{mtr} și l_{mtp} ;

S_{tCu} , N_1 - au semnificațiile prezentate anterior.

Masa fierului circuitului magnetic se apreciază cu una din relațiile:

- pentru miezurile feromagnetice din fig.3.8.a. și b.:

$$M_{Fe} = \rho_{dFe} \cdot S_c \cdot (h_{Fe} + 2 \cdot C_{Fe}) \quad [kg] \quad (3.124)$$

- pentru miezul feromagnetic din fig.3.8.c.:

$$M_{Fer,p} = \rho_{dFe} \cdot [S_c \cdot (h_{Fe} + 2 \cdot C_{Fe}) + 4 \cdot S_j \cdot (h_{Fe} + 2 \cdot l_{Fer,p} + 2 \cdot C_{Fe} - \delta)] \quad [kg] \quad (3.125)$$

- pentru miezul feromagnetic din fig.3.8.d.:

$$M_{Fer,p} = \rho_{dFe} \cdot [S_c \cdot (h_{Fe} + 2 \cdot C_{Fe}) + 4 \cdot S_j \cdot (l_{Fer,p} + h_{Fe} + 2 \cdot C_{Fe}) + S_j \cdot (2 \cdot l_{Fer,p} + D_{Fe}) - C_{Fe} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_{Fe} + 2\delta)^2] \quad [kg] \quad (3.126)$$

unde $\rho_{dFe} = 7650 \text{ kg/m}^3$ este densitatea fierului tolelor din care este confecționat miezul.

Masa pieselor auxiliare se stabilește printr-un coeficient de pondere în funcție de masa materialelor active, de exemplu:

$$M_a = 0,1 \cdot (M_{Cu} + M_{Fe}) \quad [kg] \quad (3.127)$$

Se mai calculează prețul dispozitivului electromagnetic de vehiculare a lichidelor electroconductoare cu formula:

$$\rho = \rho_{Cu} \cdot M_{Cu} + \rho_{Fe} \cdot M_{Fe} + \rho_a \cdot M_a \quad [Lei] \quad (3.128)$$

unde: ϱ_{Cu} , ϱ_{Fe} și ϱ_a sunt prețurile pe unitatea de masă a cuprului, fierului și pieselor auxiliare.

În continuare se calculează câțiva indicatori de calitate specifici, și anume:

♦ Masa specifică M_s , care reprezintă raportul dintre masa dispozitivului electromagnetic M și valoarea medie în timp a forței electromagnetice de antrenare a lichidului electroconductor F_e :

$$M_s = \frac{M}{F_e} \left[\frac{kg}{N} \right] \quad (3.129)$$

♦ Prețul specific ϱ_s , dat de raportul dintre prețul dispozitivului electromagnetic ϱ și valoarea medie în timp a forței electromagnetice de antrenare a lichidului electroconductor F_e :

$$\varrho_s = \frac{\varrho}{F_e} \left[\frac{Lei}{N} \right] \quad (3.130)$$

♦ Puterea aparentă specifică, care este raportul dintre puterea aparentă absorbită de la rețea de către bobina dispozitivului electromagnetic și valoarea medie în timp a forței electromagnetice de antrenare a lichidului electroconductor F_e :

$$S_s = \frac{S}{F_e} \left[\frac{VA}{N} \right] \quad (3.131)$$

Indicatorii de calitate prezentați ne permit să justificăm cantitativ eficiența modificărilor constructive efectuate pentru modernizarea unui dispozitiv electromagnetic de vehiculare a lichidelor electroconductoare.

3.4.8. Program de proiectare asistată de calculator a dispozitivelor electromagnetice ale pompelor magnetohidrodinamice de repulsie

Pe baza algoritmului de proiectare conceput în paragrafele (3.4.1)...(3.4.7) s-a întocmit un program de proiectare asistată de calculator a dispozitivelor electromagnetice din componența pompelor magnetohidrodinamice de repulsie, program care are structura din fig.3.12.

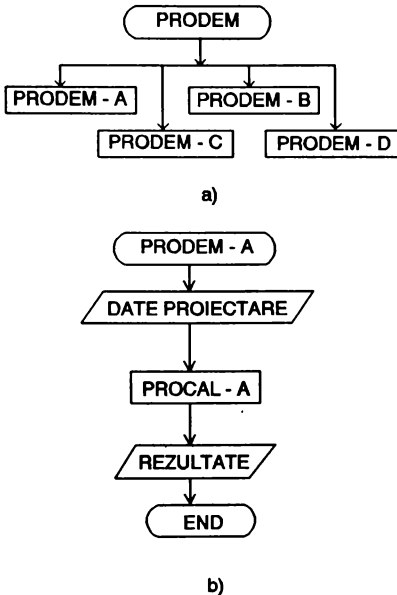


Fig.3.12. Programul de proiectare asistată de calculator a dispozitivelor electromagnetice ale pompelor magnetohidrodinamice de repulsie: a) Structura programului principal de proiectare; b) Structura subprogramului PRODEM-A.

Programul principal PRODEM este compus din patru subprograme denumite PRODEM-A, PRODEM-B, PRODEM-C, și PRODEM-D, ce corespund celor patru tipuri de dispozitive electromagnetice întâlnite în construcția pompelor magnetohidrodinamice de repulsie (vezi fig.3.8.). Fiecare subprogram cuprinde trei părți principale, având o parte de citire a datelor inițiale de proiectare dintr-un fișier, apoi procedura de calcul propriu-zis și în final se scriu rezultatele obținute în același fișier de date.

Procedurile de calcul PROCAL-A, PROCAL-B, PROCAL-C și PROCAL-D urmăresc fidel algoritmul de calcul prezentat în paragrafele (3.4.1)...

(3.4.7), variabilele folosind aproape în exclusivitate aceleași simboluri (vezi fig.3.13 și ANEXA-8). Astfel, după calculul întrefierului și a dimensiunilor transversale ale miezului

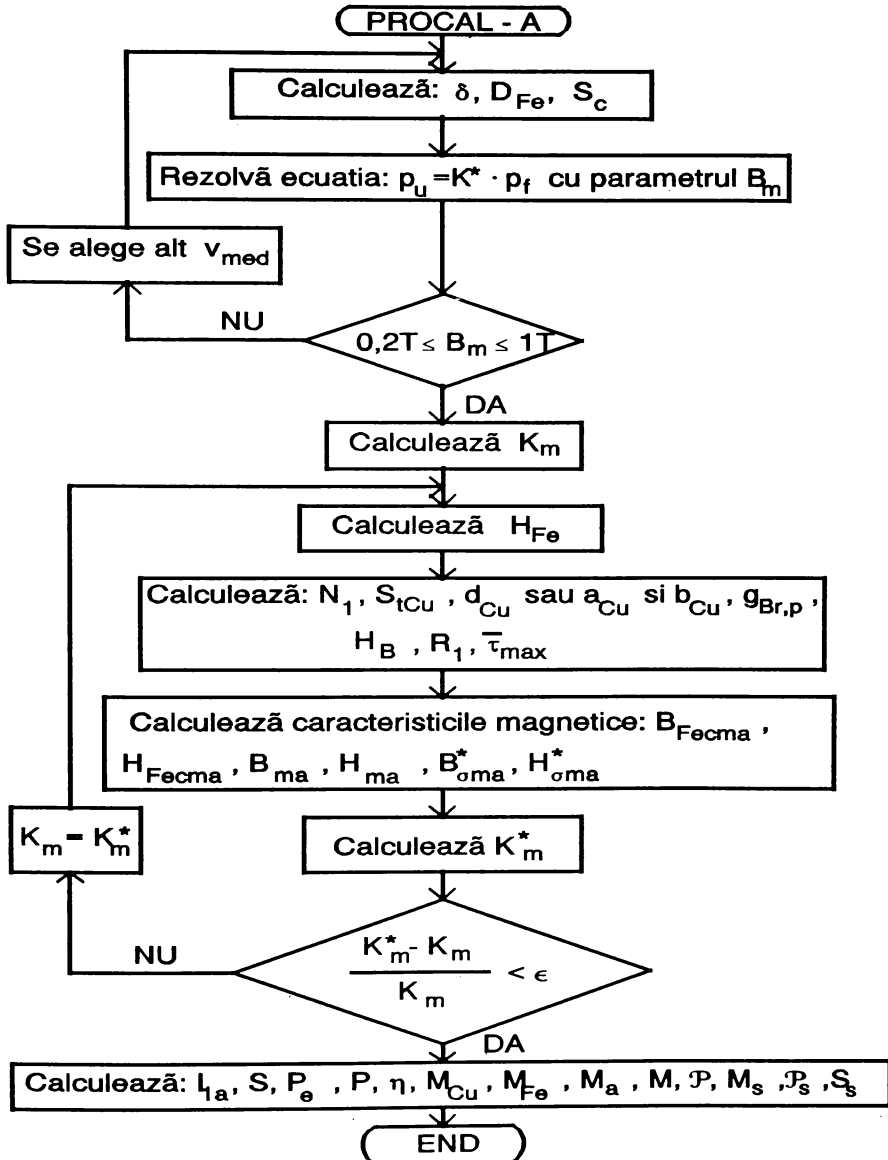


Fig.3.13. Programul de proiectare asistată de calculator a dispozitivelor electromagnetice ale pompelor magnetohidrodinamice de repulsie. Procedura PROCAL-A de calcul electromagnetic propriu-zis.

feromagnetic se determină valoarea inducției magnetice în întrefier. Dacă inducția magnetică nu are valori considerate normale pentru construcțiile obișnuite de pompe magnetohidrodinamice de repulsie, se reia calculul de dimensionare cu o altă valoare pentru viteza medie a lichidului electroconductor în zona de pompare.

Apoi se continuă calculul, determinându-se succesiv: coeficientul de majorare K_m a căderii de tensiune magnetică din întrefier, dimensiunile ferestrei miezului feromagnetic și a parametrilor bobinei inductoare (număr spire, dimensiunea conductorului de bobinaj, rezistența bobinei etc.).

Acum se pot calcula caracteristicile magnetice (inducția magnetică, intensitatea câmpului magnetic și permeabilitatea magnetică în diverse porțiuni ale circuitului magnetic) ale dispozitivului electromagnetic dimensionat precum și valoarea reală a coeficientului K_m . Se compară valoarea obținută din calcul cu cea impusă anterior prin datele de proiectare și dacă eroarea este mai mare decât o eroare ϵ impusă, de exemplu 5%, atunci se reia calculul de dimensionare a dispozitivului electromagnetic al pompei magnetohidrodinamice de repulsie, de la calculul ferestrei miezului feromagnetic, cu valoarea calculată a lui K_m ca dată de calcul.

În final se calculează: curentul absorbit de bobina inductoare, puterea aparentă absorbită de la rețea, puterea activă absorbită de la rețea, puterea electromagnetică în lichidul electroconductor (indus), randamentul dispozitivului electromagnetic de vehiculare a lichidelor electroconductoare și unii indicatori de calitate pentru dispozitivul electromagnetic proiectat.

Rezultatele principale ale calculului de proiectare se afișează într-o fereastră de dialog, după care acestea pot fi salvate într-un alt fișier deschis în prealabil printr-un dialog interactiv cu operatorul. Din acest fișier, ulterior, ele vor putea fi citite de alte programe, în vederea analizei numerice a dispozitivului electromagnetic de vehiculare a lichidelor electroconductoare sau în vederea întocmirii documentației tehnice de execuție.

3.5. APLICAȚII ȘI CONCLUZII

Temă de proiectare. Proiectarea unui dispozitiv electromagnetic pentru o pompă magnetohidrodinamică de repulsie, cu următoarele date inițiale:

- ◆ Presiunea utilă a pompei magnetohidrodinamice de repulsie:

$$p_u = 5 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$$

- ◆ Debitul volumic de lichid electroconductor vehiculat de pompa magnetohidrodinamică de repulsie:

$$V = 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

- ◆ Lichidul electroconductor vehiculat: plumb
- ◆ Temperatura lichidului electroconductor vehiculat: $\theta = 400^\circ \text{C}$.
- ◆ Conductivitatea electrică a lichidului electroconductor: $\sigma = 1,02 \cdot 10^6 \text{ 1}/\Omega\text{m}$.
- ◆ Densitatea lichidului electroconductor: $\rho_d = 10510 \text{ kg/m}^3$.
- ◆ Vâscozitatea cinematică a lichidului electroconductor: $\nu = 2,1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$.
- ◆ Tensiunea de alimentare: $U = 220 \text{ V}$.
- ◆ Frecvența tensiunii de alimentare: $f = 50 \text{ Hz}$.
- ◆ Grosimea peretelui canalului de curgere a lichidului electroconductor: $a_1 = 0,001 \text{ m}$. Peretele canalului de curgere se confecționează din oțel inoxidabil 10TNC-180, STAS 3583/64, având conductivitatea electrică $\sigma_1 = 2 \cdot 10^6 \text{ 1}/\Omega\text{m}$.
- ◆ Grosimea izolației termice dintre miezul feromagnetic și canalul de curgere: $a_2 = 0,003 \text{ m}$.
- ◆ Factorul de formă al dispozitivului electromagnetic: $ff = 3$.
- ◆ Miezul feromagnetic și bobina inductoare, care se va executa în clasa de izolație H, vor fi răcite forțat cu aerul

furnizat de o suflantă electrică.

◆ Densitatea de curent în conductorul înfășurării:
 $J_1 = 3 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$.

◆ Supratemperatura maximă admisibilă a înfășurării:
 $\bar{\tau}_{adm} = 160^\circ \text{C}$.

◆ Transmisivitatea termică la suprafața exterioară a bobinei inductoare: $\alpha = 20 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ \text{C}$.

◆ Coeficientul de umplere al înfășurării: $K_u = 0,5$.

◆ Inducția magnetică maximă în miezul feromagnetic:
 $B_{Fecm} = 1,2 \text{ T}$. Miezul feromagnetic se va realiza din tole de tablă laminată la rece, cu cristale orientate, cu grosimea de (0,28...0,35) mm și pierderi de magnetizare reduse
 $P_{10/50} = 0,45 \text{ W/kg}$.

◆ Coeficientul de împachetare al miezului feromagnetic:
 $K_{Fe} = 0,95$.

După introducerea datelor de proiectare prezentate anterior, se stabilește varianta constructivă de dispozitiv electromagnetic, care va constitui organul motor al viitoarei pompe magnetohidrodinamice de repulsie. Decizia, privind adoptarea variantei constructive, este luată de comun acord proiectant-beneficiar și are în vedere:

◆ posibilitățile tehnologice de execuție și montare ale firmei ce urmează a realiza pompa magnetohidrodinamică de repulsie;

◆ costul și posibilitățile de procurare a materialelor necesare fabricării dispozitivului electromagnetic al pompei magnetohidrodinamice de repulsie;

◆ caracteristicile tehnice ale dispozitivului electromagnetic din componența pompei magnetohidrodinamice de repulsie.

Pentru a facilita luarea acestei decizii, în tabelul 3.2. se prezintă o clasificare a variantelor constructive ale unui dispozitiv electromagnetic de vehiculare a lichidelor electroconductoare după dificultatea tehnologică de execuție a

acestora, după masa cuprului și respectiv masa fierului necesar la realizarea lor, precum și după randamentul electromagnetic al acestora.

TABELUL 3.2.

Clasificarea variantelor constructive ale unui dispozitiv electromagnetic de vehiculare a lichidelor electroconductoare.

Criteriul de clasificare	Dispozitiv electromagnetic de vehiculare a lichidelor electroconductoare având forma și dimensiunile rezultate prin rularea subprogramului:			
	PRODEM-A	PRODEM-B	PRODEM-C	PRODEM-D
Dificultatea execuției	<i>DEM cu execuție simplă</i>		DEM cu execuție relativ dificilă	DEM cu execuție dificilă
Masa cuprului necesar la realizarea bobinei inductoare	<i>DEM cu masa netă a cuprului relativ mică</i>	DEM cu masa netă a cuprului mare		<i>DEM cu masa netă a cuprului relativ mică</i>
Masa fierului necesar la realizarea miezului feromagnetic	<i>DEM cu masa netă a fierului mică</i>		DEM cu masa netă a fierului mare	
Valoarea randamentului electromagnetic	DEM cu randament relativ scăzut	DEM cu randament scăzut	<i>DEM cu randament mediu</i>	<i>DEM cu randament ridicat</i>

Considerând că s-a stabilit să se proiecteze un dispozitiv electromagnetic prevăzut cu un miez feromagnetic ca în fig.3.8.d, cu datele de proiectare prezentate, se rulează subprogramul PRODEM-D.

Prin rularea acestui subprogram, pe un calculator IBM PC/AT 486, se obțin următoarele rezultate principale ale calculului de proiectare:

PROGRAM DE PROIECTARE ASISTATA DE CALCULATOR A
DISPOZITIVELOR ELECTROMAGNETICE DE VEHICULARE
A LICHIDELOR ELECTROCONDUCTOARE
VARIANTA PRODEM - D.
UNIVERSITATEA POLITEHNICA TIMISOARA
Ing. VATAU DORU
REZULTATELE CALCULULUI DE PROIECTARE

$\delta = 0.017$
 $D_{Fe} = 0.0537$
 $c_{Fe} = 0.0091$
 $d_{Fe} = 0.062$
 $Sc = 0.0022$

$S_j = 5.3061 \cdot 10^{-4}$
 $B_m = 0.7293$
 $k_m = 1.2$
 $h_{Fe} = 0.0755$
 $l_{Fep} = 0.093$
 $N_{11} = 303$

$H_B = 0.0645$
 $B_{Fec} = 1.2$

$St_{Cu} = 1.0302 \cdot 10^{-5}$

$P_e = 411.4241$
 $P = 587.6048$
 $\eta = 0.7001$
 $M = 23.5106$
 $M_{Cu} = 16.1924$
 $M_{Fe} = 5.1881$
 $N_a = 2.1301$

Programul de calcul de proiectare conceput se remarcă prin simplitate și eficiență, el asigurând o proiectare de înaltă calitate prin luarea în considerare a neliniarității circuitului magnetic și oferind posibilitatea unor calcule iterative. În aceste calcule iterative un parametru inițial se ia cu o valoare impusă și în final el se calculează. Calculul se reia cu valoarea calculată ca valoare impusă, dacă această valoare diferă față de cea impusă cu o eroare mai mare decât eroarea admisibilă.

De asemenea, datele inițiale de proiectare și rezultatele calculului de proiectare se pot salva într-un fișier creat în prealabil de către proiectant. Deci, prin rulări succesive ale programului de calcul de proiectare se va putea forma o bibliotecă de dispozitive electromagnetice de vehiculare a lichidelor electroconductoare proiectate.

Calculul de proiectare asistat de calculator durează doar câteva minute, iar fișierele create sunt foarte comod de utilizat de către proiectant, acesta urmând a trece la optimizarea, desenarea și analiza numerică a dispozitivului.

CAPITOLUL 4

OPTIMIZAREA PROIECTĂRII DISPOZITIVELOR ELECTROMAGNETICE DESTINATE ANTRENĂRII LICHIDELOR ELECTROCONDUCTOARE

4.1. GENERALITĂȚI PRIVIND OPTIMIZAREA PROIECTĂRII. METODE DE OPTIMIZARE A PROCESELOR DE PROIECTARE

Proiectarea unui anumit dispozitiv electromagnetic poate fi făcută în mai multe feluri, în funcție de criteriile care stau la baza proiectării. Oricare ar fi aceste criterii, rezultatul proiectării conduce la alegerea unor valori pentru variabilele de proiectare. Deoarece aceste valori pot fi alese într-o gamă largă, cu condiția satisfacerii unor limitări și restricții, pentru proiectant se va pune problema optimizării proiectării.

Soluția optimă a unei probleme de proiectare este cea soluție care conduce la cea mai bună alegere a valorilor variabilelor de proiectare în condițiile îndeplinirii tuturor limitărilor și restricțiilor impuse.

Metodele și tehnicile aplicate pentru determinarea soluției optime sunt cele dezvoltate în programarea matematică liniară și neliniară [94, 140].

Rezolvarea unei probleme de optimizare în general implică minimizarea sau maximizarea unei funcții obiectiv numită și funcție criteriu [29, 107, 98].

Cea mai frecventă formă a funcției obiectiv (criteriu) este cea scalară,

$$O = O(x_i) \quad (4.1)$$

unde x_i este un element al vectorului variabilelor de proiectare.

$$\bar{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (4.2)$$

Această formă a funcției obiectiv (criteriu) corespunde optimizării unicriteriale, adică optimizării dispozitivului electromagnetic în raport cu un singur parametru x_i al său.

O altă formă a funcției obiectiv (criteriu) este cea vectorială:

$$\bar{O} = f(O_1, O_2, \dots, O_n) \quad (4.3)$$

în care O_1, O_2, \dots, O_n sunt funcții obiectiv scalare. Problemele acestei optimizări numită vectorială sau multicriterială, pot fi reduse la probleme de optimizare scalară prin introducerea unei relații de ordine în mulțimea funcțiilor obiectiv (criteriu) componente [79].

Ca funcție obiectiv (criteriu), în cazul dispozitivelor electromagnetice se pot folosi masa, volumul, costul, consumul de putere, randamentul etc.

Minimizarea sau maximizarea funcției obiectiv (criteriu) se va face în condițiile unor restricții de tipul:

$$\bar{X}_{\min} \leq \bar{X} \leq \bar{X}_{\max} \quad (4.4)$$

unde \bar{X}_{\min} și \bar{X}_{\max} reprezintă vectori asemănători lui \bar{x} care conțin limita minimă și maximă a variabilelor de proiectare.

În prezent, odată cu dezvoltarea performanțelor calculatoarelor și cu lărgirea accesibilității lor, optimizarea proiectării începe să devină o tehnică larg folosită. De asemenea, creșterea performanțelor calculatoarelor a făcut să devină accesibilă și metoda de optimizare prin căutare directă. Această metodă, deși mai simplă, necesită un volum mare de calcul, care însă, pe actualele calculatoare personale compatibile IBM, se realizează într-un timp de ordinul a câteva minute.

4.2. FORMULAREA PROBLEMEI DE OPTIMIZARE A DISPOZITIVELOR ELECTROMAGNETICE DE VEHICULARE A LICHIDELOR ELECTROCONDUCTOARE

Întucât până în momentul de față au fost executate în special unicate sau serii mici de pompe magnetohidrodinamice de repulsie, iar experiența de exploatare este încă redusă, se au în vedere, de regulă, optime parțiale ale proiectării, în raport cu un singur criteriu de optimizare (optimizare unicriterială).

Formularea problemei de optimizare a dispozitivelor electromagnetice din componența pompelor magnetohidrodinamice de repulsie va presupune:

- ♦ stabilirea variabilelor de proiectare de optimizat, care pot fi: inducția magnetică în lichidul electroconductor din zona de pompare (întrefier), viteza medie a lichidului electroconductor, grosimea zonei de pompare ocupată de lichidul electroconductor, factorul de formă al dispozitivului electromagnetic, densitatea de curent în înfășurare etc.;

- ♦ alegerea funcției obiectiv (criteriu), ce poate fi: maximul randamentului, maximul factorului de putere, minimul puterii aparente absorbite de la rețea, minimul masei dispozitivului electromagnetic etc.;

- ♦ precizarea restricțiilor impuse variabilelor de proiectare, acestea fiind restricții de tip inegalitate (vezi relația (4.4)).

Deoarece procedurile de calcul PROCAL sunt complexe și conțin procese de calcul iterativ, pentru funcția obiectiv nu vor putea fi stabilite formule analitice. Lipsa formulilor analitice pentru funcția obiectiv (criteriu) face imposibilă găsirea unor informații despre gradientul lor și deci nu se vor putea utiliza metodele de optimizare neliniare.

Metoda de optimizare a proiectării dispozitivelor electromagnetice de vehiculare a lichidelor electroconductoare utilizată în prezenta teză, va fi (având în vedere cele precizate anterior) o metodă liniară, și anume metoda căutării directe.

4.3. ALGORITM ȘI PROGRAM DE OPTIMIZARE A PROIECTĂRII DISPOZITIVELOR ELECTROMAGNETICE DE ANTRENARE A LICHIDELOR ELECTROCONDUCTOARE

Algoritmul și programul de optimizare, denumit OPTDEM, a proiectării dispozitivelor electromagnetice ale pompelor magnetohidrodinamice de repulsie, utilizează procedurile de calcul PROCAL din programul de proiectare asistată de calculator a acestor dispozitive.

Structura algoritmului și programului de optimizare a proiectării dispozitivelor electromagnetice destinate antrenării lichidelor electroconductoare este prezentată în fig.4.1.

Prima etapă a programului de optimizare OPTDEM constă în introducerea datelor optimizării, acestea fiind: funcția obiectiv F , variabila curentă de proiectare v_c , limita minimă x_{cmin} și respectiv limita maximă x_{cmax} a variabilei curente de proiectare și numărul punctelor de eșantionare npe a intervalului $[x_{cmin}, x_{cmax}]$.

Apoi, se determină pasul de creștere a variabilei curente de proiectare, notat cu pas .

Se atribuie valorii $v(u)$ prima valoare din șirul de valori ale variabilei de proiectare. În continuare, se citesc din fișierul de date $fdate$ toate variabilele de proiectare $varpro$ și se atribuie variabilei curente de proiectare valoarea $v(u)$. Se execută procedura de calcul PROCAL, după care se trece la valoarea următoare a variabilei curente de proiectare și se reia calculul până la determinarea tuturor celor $npe+1$ variante de dispozitive electromagnetice de vehiculare a lichidelor electroconductoare. Valorile funcției obiectiv (criteriu) corespunzătoare tuturor variantelor de dispozitive electromagnetice de antrenare a lichidelor electroconductoare calculate se memorează în vectorul F .

În acest moment execuția programului încetează până la o comandă din partea proiectantului ce decide dacă se va calcula valoarea maximă sau valoarea minimă a funcției obiectiv (criteriu).

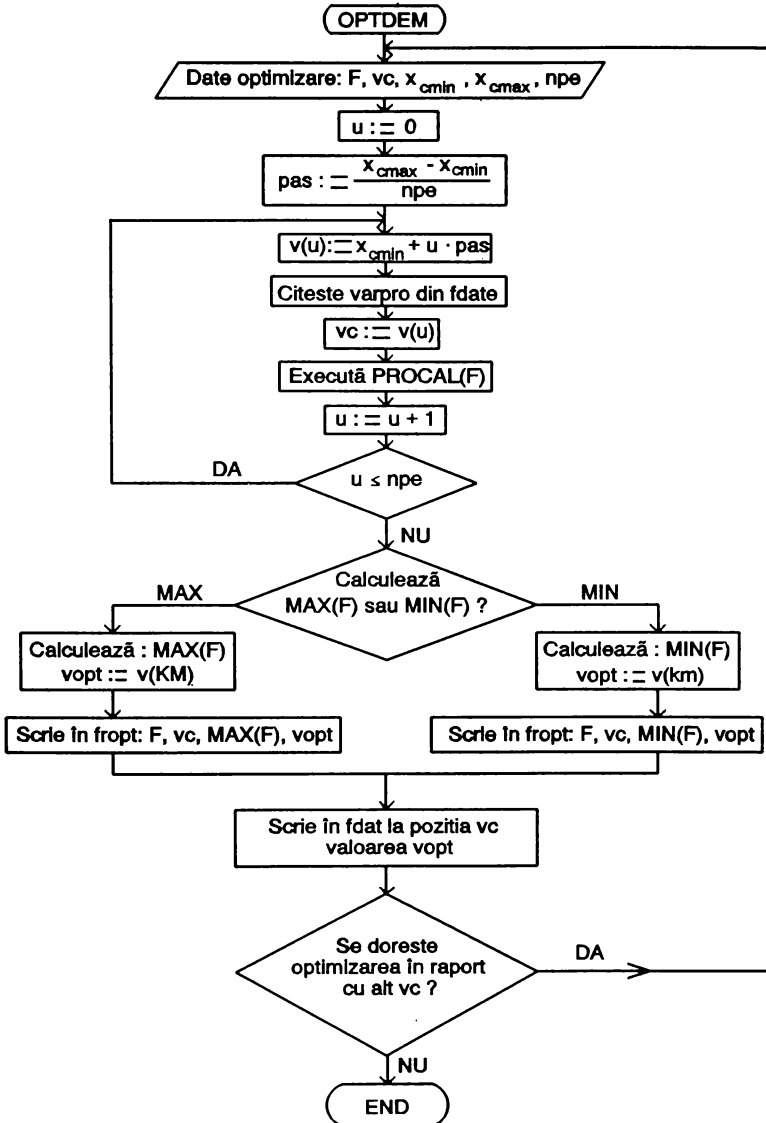


Fig.4.1. Schema logică a programului de optimizare a proiectării dispozitivelor electromagnetice de vehiculare a lichidelor electroconductoare.

După acest calcul, se reține valoarea optimă v_{opt} a variabilei curente de proiectare pentru care s-a obținut valoarea maximă sau minimă a funcției obiectiv (criteriu).

În final se scriu în fișierul de rezultate a optimizării f_{opt} (deschis în prealabil) valorile lui F , vc , $MAX(F)$, v_{opt} , iar în fișierul de date f_{dat} se înscrie la poziția vc valoarea optimă a variabilei curente v_{opt} .

Dacă se dorește optimizarea în raport și cu o altă variabilă curentă vc , atunci se rulează din nou programul descris, efectuând în datele de optimizare modificarea corespunzătoare.

De asemenea, optimizarea proiectării dispozitivelor electromagnetice, ale pompelor magnetohidrodinamice de repulsie, se poate relua și cu o altă funcție obiectiv (criteriu).

4.4. APLICAȚII ȘI CONCLUZII

În conformitate cu cele prezentate în paragraful 3.5., prin rularea programului de proiectare asistată de calculator PRODEM, proiectantul obține datele complete (dimensiuni, parametri tehnici, indicatori de calitate) ale dispozitivului electromagnetic de vehiculare a plumbului. Acest dispozitiv electromagnetic, deja proiectat, urmează a fi supus procesului de optimizare.

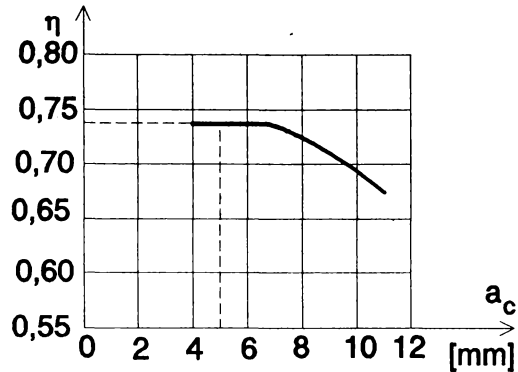
Pentru optimizarea proiectării dispozitivului electromagnetic de antrenare a plumbului se alege ca funcție obiectiv (criteriu) randamentul dispozitivului electromagnetic considerat, iar dintre variabilele de proiectare de optimizat se aleg doar două, și anume: grosimea zonei de pompare ocupată de lichidul electroconductor a_c și viteza medie a lichidului electroconductor v_{med} . Se admit, de asemenea, următoarele restricții pentru variabilele de proiectare de optimizat:

$$\begin{aligned} 0,004\text{ m} &\leq a_c \leq 0,011\text{ m} \\ 0,2\text{ m/s} &\leq v_{med} \leq 1\text{ m/s} \end{aligned} \quad (4.5)$$

Prin rularea programului de optimizare a proiectării dispozitivelor electromagnetice ale pompelor magnetohidrodinamice de repulsie, program denumit OPTDEM, rezultă rezultatele prezentate, sub forma unor grafice, în fig.4.2. și fig.4.3.

Pentru obținerea graficului reprezentat în fig. 4.2. s-a rulat programul OPTDEM, considerând ca variabilă curentă grosimea zonei de pompare a_c . Din acest grafic rezultă valoarea optimă a grosimii zonei de pompare ocupată de lichidul electroconductor $a_{c_{opt}} = 5\text{ mm}$, căreia îi corespunde un randament al dispozitivului electromagnetic al pompei magnetohidrodinamice de repulsie $\eta = 0,743$.

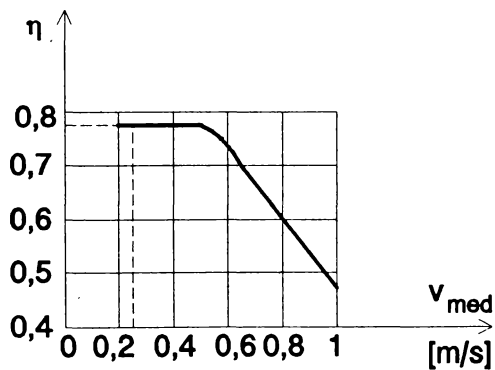
Graficul reprezentat în fig.4.3. se obține continuând optimizarea dispozitivului electromagnetic, al pompei magnetohidrodinamice de repulsie, prin folosirea în calculul de



$$a_{\text{copt}\eta} = 5 \text{ mm} \rightarrow \eta = 0,743$$

$$a_{\text{copt}\eta} = (4 \dots 6,5)$$

Fig.4.2. Dependența randamentului dispozitivului electromagnetic, al pompei magnetohidrodinamice de repulsie destinată vehiculării plumbului, de grosimea zonei de pompare.



$$v_{\text{medopt}\eta} = 0,25 \text{ m/s} \rightarrow \eta = 0,782$$

$$v_{\text{medopt}\eta} = (0,2 \dots 0,55)$$

Fig.4.3. Dependența randamentului dispozitivului electromagnetic, al pompei magnetohidrodinamice de repulsie destinată vehiculării plumbului, de viteza medie a plumbului topit.

proiectare a grosimii optime a zonei de pompare și considerarea celeilalte variabile curente: viteza medie a lichidului electroconductor. Din grafic se observă că valoarea optimă a vitezei medii a plumbului topit este $v_{medopt} = 0,25$ m/s și că aceasta corespunde unui randament al dispozitivului electromagnetic al pompei magnetohidrodinamice de repulsie $\eta = 0,782$.

Rezultă că, pe măsură ce se optimizează câte o variabilă de proiectare, randamentul dispozitivului electromagnetic al pompei magnetohidrodinamice de repulsie devine tot mai mare, crescând de la valoarea 0,70 corespunzătoare proiectării neoptimizate, la valoarea 0,743 și ajungând în final la valoarea 0,782. În acest moment se consideră optimizarea proiectării dispozitivului electromagnetic al pompei magnetohidrodinamice de repulsie, terminată.

Acum, se va executa proiectarea finală a dispozitivului electromagnetic, din componența pompei magnetohidrodinamice de repulsie destinată vehiculării plumbului, utilizând valorile optime ale variabilelor de proiectare determinate anterior. Rezultatele finale sunt prezentate în fig.4.4.

Prin vizualizarea clară pe ecranul monitorului a reprezentării grafice a funcției obiectiv (criteriu) în raport cu o variabilă de proiectare de optimizat se oferă proiectantului informații utile asupra intervalului de optimalitate al variabilei de proiectare și nu numai asupra valorii optime a acesteia.

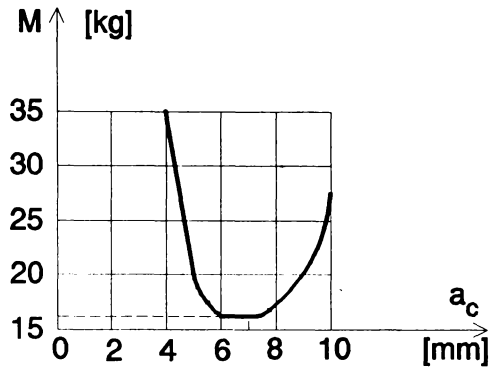
Intervalele de optimalitate obținute cu ajutorul mai multor criterii de optimizare permit prin intersectarea lor obținerea unui optim global al variabilei de proiectare considerate.

Astfel, dacă reluăm optimizarea proiectării dispozitivului electromagnetic, al pompei magnetohidrodinamice de repulsie destinată vehiculării plumbului, cu o altă funcție obiectiv (criteriu) și anume masa minimă a materialelor active, cu aceleași variabile de proiectare de optimizat (a_c și v_{med}) și cu aceleași restricții impuse variabilelor de proiectare de optimizat (vezi relația (4.5)), vom obține rezultatele prezentate în fig.4.5., fig.4.6. și fig.4.7.

PROGRAM DE PROIECTARE ASISTATA DE CALCULATOR A
DISPOZITIVELOR ELECTROMAGNETICE DE VEHICULARE
A LICHIDELOR ELECTROCONDUCTOARE
VARIANTA PRODEM - D.
UNIVERSITATEA POLITEHNICA TIMISOARA
Ing. VATAU DORU
REZULTATELE CALCULULUI DE PROIECTARE

$\delta = 0.013$	HB = 0.8305
DFe = 0.2416	BFec = 1.2
cFe = 0.0606	
dFe = 0.1893	StCu = 6.8666 · 10 ⁻⁵
Sc = 0.0436	Pe = 542.8373
Sj = 0.0189	P = 694.0647
Dm = 0.3143	" = 0.7821
km = 1.2	M = 164.4294
hFe = 0.0415	MCu = 11.3768
lFep = 0.0712	MFe = 130.1044
N11 = 19	Ma = 14.9481

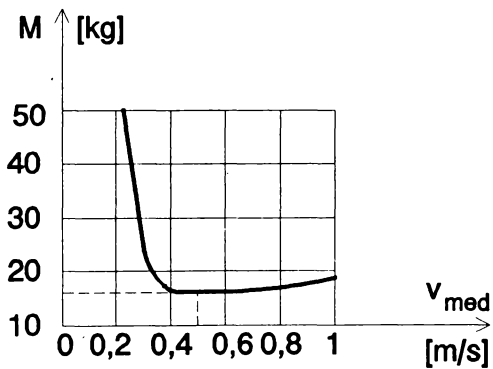
Fig.4.4. Rezultatele proiectării optime a dispozitivului electromagnetic, al pompei magnetohidrodinamice de repulsie destinată vehiculării plumbului, după criteriul de optimizare al randamentului maxim.



$$a_{\text{coptM}} = 7 \text{ mm} \rightarrow M = 16,842 \text{ kg}$$

$$a_{\text{coptM}} = (6 \dots 7,5)$$

Fig.4.5. Dependența masei dispozitivului electromagnetic, al pompei magnetohidrodinamice de repulsie destinată vehiculării plumbului, de grosimea zonei de pompare.



$$v_{\text{medoptM}} = 0,5 \text{ m/s} \rightarrow M = 16,85$$

$$v_{\text{medoptM}} = (0,4 \dots 0,6)$$

Fig.4.6. Dependența masei dispozitivului electromagnetic, al pompei magnetohidrodinamice de repulsie destinată vehiculării plumbului, de viteza medie a plumbului topit.

PROGRAM DE PROIECTARE ASISTATA DE CALCULATOR A
DISPOZITIVELOR ELECTROMAGNETICE DE VEHICULARE
A LICHIDELOR ELECTROCONDUCTOARE
VARIANTA PRODEM - D.
UNIVERSITATEA POLITEHNICA TIMISOARA
Ing. UATAU DORU
REZULTATELE CALCULULUI DE PROIECTARE

$\delta = 0.015$	HB = 0.0304	
DFe = 0.0759	BFec = 1.2	
cFe = 0.0151		-6
dFe = 0.0749	StCu = 0.5375 10	
Sc = 0.0043	Fe = 203.0472	
Sj = 0.0011	P = 279.6246	
Bm = 0.3429	n = 0.729	
km = 1.2	M = 16.0424	
hFe = 0.0494	MCu = 6.030	
lFep = 0.0734	MFe = 8.4732	
M11 = 192	Ma = 1.5311	

Fig.4.7. Rezultatele proiectării optimale a dispozitivului electromagnetic, al pompei magnetohidrodinamice de repulsie destinată vehiculării plumbului, după criteriul de optimizare al masei minime.

Grosimii a_c a zonei de pompare ocupată de lichidul electroconductor îi corespunde, conform fig.4.2., intervalul de optimalitate (4 ... 6,5) mm și conform figurii 4.5. intervalul de optimalitate (6 ... 7,5) mm.

Pentru viteza medie a lichidului electroconductor rezultă din fig.4.3. intervalul de optimalitate (0,2 ... 0,55) m/s și din fig.4.6. intervalul de optimalitate (0,4 ... 0,6) m/s.

Intersectând, acum, aceste intervale de optimalitate rezultă următoarele optime globale ale variabilelor de proiectare considerate:

$$a_{copt} = 6,5 \text{ mm}$$

$$V_{medopt} = 0,5 \text{ m/s}$$

Cu aceste valori optime determinate se trece la proiectarea dispozitivului electromagnetic, al pompei magnetohidrodinamice de repulsie destinată vehiculării plumbului, cu ajutorul programului PRODEM-D și rezultă rezultatele din fig.4.8

Programul de optimizare a proiectării dispozitivelor electromagnetice ale pompelor magnetohidrodinamice de repulsie este rapid, eficient și foarte ușor de utilizat de către proiectant. Astfel, optimizarea a trei variabile de proiectare durează maxim 10 minute.

PROGRAM DE PROIECTARE ASISTATA DE CALCULATOR A
DISPOZITIVELOR ELECTROMAGNETICE DE VEHICULARE
A LICHIDELOR ELECTROCONDUCTOARE
VARIANTA PRODEM - D.
UNIVERSITATEA POLITEHNICA TIMISOARA
Ing. VATAU DORU
REZULTATELE CALCULULUI DE PROIECTARE

$\delta = 0.0145$	HB = 0.033
DFe = 0.0034	BFec = 1.2
cFe = 0.0172	
dFe = 0.0795	-6
Sc = 0.0052	StCu = 0.1333 · 10
Sj = 0.0013	Pe = 240.2001
Bm = 0.2799	P = 310.127
km = 1.2	m = 0.0003
hFe = 0.044	M = 16.0054
lFep = 0.0697	MCu = 5.5321
N11 = 159	MFe = 9.9092
	Ma = 1.5441

Fig.4.8. Rezultatele proiectării optime a dispozitivului electromagnetic, al pompei magnetohidrodinamice de repulsie destinată vehiculării plumbului, după criteriile de optimizare: randament maxim și masă minimă.

CAPITOLUL 5

ANALIZA NUMERICĂ A CÂMPULUI MAGNETIC SI A CÂMPULUI TERMIC AL DISPOZITIVELOR ELECTROMAGNETICE DIN COMPONENTA POMPELOR MAGNETOHIDRODINAMICE DE REPULSIE

5.1. GENERALITĂȚI

Proiectarea clasică a unui dispozitiv electromagnetic în general are următoarele trei etape principale:

a) Claculul preliminar, care conduce la aprecierea principalelor dimensiuni constructive, precum și a valorii solenației necesare.

b) Proiectarea dispozitivului electromagnetic cu materiale standardizate cum sunt: tolele din tablă silicioasă, conductoarele de bobinaj, izolația din construcția bobinei. În această etapă se definitivează dimensiunile diferitelor elemente constructive și se elaborează desenul dispozitivului electromagnetic.

c) Calculele de verificare, prin care se verifică dacă dispozitivul electromagnetic îndeplinește principalele cerințe tehnice impuse. În funcție de rezultatele calculelor, procesul de proiectare se încheie sau se reia de la una din etapele precedente.

Proiectarea și optimizarea proiectării asistate de calculator a dispozitivelor electromagnetice ale pompelor magnetohidrodinamice de repulsie pot fi încadrate în primele două etape a) și b)., iar analiza numerică a câmpului magnetic și a câmpului termic al dispozitivelor electromagnetice ale pompelor magnetohidrodinamice de repulsie (ce urmează a fi prezentată în cadrul acestui capitol) ar corespunde etapei c).

Analiza numerică a câmpului magnetic și a câmpului termic al dispozitivelor electromagnetice ale pompelor magnetohidrodinamice de repulsie, permite proiectantului să calculeze cu precizie mărită distribuția câmpului magnetic, distribuția câmpului termic și mărimile electrice și termice derivate.

Procesul de analiză numerică conduce la rezultate similare experiențelor de laborator, dar viteza cu care se obțin rezultatele este incomparabil mai mare, flexibilitatea modelării este deosebită, iar informațiile la care avem acces sunt mult mai

detaliate. Experimentul de laborator este însă necesar în final, după realizarea practică a prototipului, pentru a confirma caracteristicile tehnice ale dispozitivului electromagnetic de vehiculare a lichidelor electroconductoare și pentru a valida metodele de proiectare și analiză numerică utilizate.

De-a lungul timpului, au fost elaborate și utilizate cu succes mai multe metode de analiză numerică a câmpului magnetic și a câmpului termic, printre care: metoda diferențelor finite, metoda elementelor finite și metoda elementelor de frontieră. Deși fiecare metodă își are avantajele și dezavantajele ei, în prezent în implementarea programelor de analiză numerică comercializate, corespunzătoare aplicațiilor cu condiții la limită, este utilizată, aproape cu exclusivitate, metoda elementelor finite. Aceasta este și metoda aleasă pentru analiza numerică a câmpului magnetic și a câmpului termic al dispozitivelor electromagnetice de vehiculare a lichidelor electroconductoare.

Cristalizarea metodei elementelor finite în forma ei actuală se atribuie lui Clough (1960), care în comunicarea "The finite element method in plane stress analysis" prezentată la cea de-a doua Conferință, ASCE, Pittsburgh, S.U.A., propune și denumirea ei. După 1963, conceptele propuse de Clough încep să se consolideze și să capete noi dimensiuni. Un rol important îl joacă în acest sens lucrările lui Melosh (1963), Fraeijs de Veubeke (1964) și Jones (1964) în care se recunoaște relația dintre metoda elementelor finite (MEF) și metoda Ritz-Galerkin.

Începe apoi, o perioadă de consolidare și de generalizare a aplicării MEF în diverse domenii ingineresti. Visser (1965), Wilson și Nickell (1966), Zienkiewicz și colaboratorii săi (1965 + 1967) se numără printre primii cercetători care au demonstrat generalitatea acestei metode prin aplicarea ei la probleme de câmp.

Aplicarea MEF în mecanica fluidelor apare ceva mai târziu, datorită dificultăților de modelare și de soluționare a ecuațiilor Navier-Stokes. Primele lucrări în acest domeniu se

datoresc îndeosebi lui Martin (1968), Oden (1969, 1970), Baker (1970, 1973), Taylor și Hood (1973, 1974).

Un rol important în însușirea acestei metode de către cercetătorii din întreaga lume l-au avut și excelențele monografii publicate de Zienkiewicz (1967, 1971, 1977), Oden (1972), Oden și Raddi (1976), Norrie și de Vries (1978), Irons și Ahmad (1980), Rao (1982).

În ceea ce privește programele de analiză numerică a câmpului magnetic și a câmpului termic cu ajutorul MEF, acestea sunt de două tipuri:

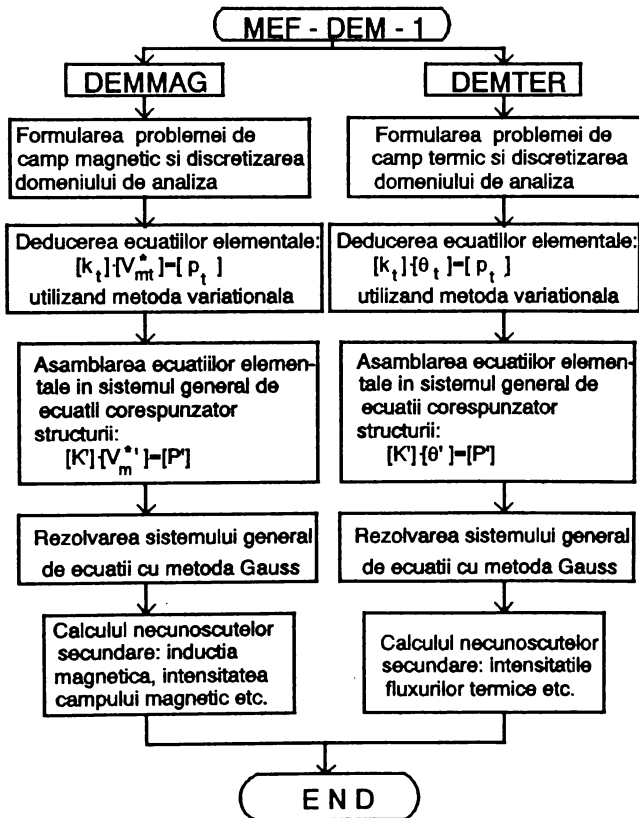
- ◆ Programe profesionale, ce permit rezolvarea numerică bidimensională (FLUX 2D) sau tridimensională (TOSCA, FLUX 3D) a unor clase relativ largi de probleme de câmp, sunt extrem de performante și pot fi rulate numai pe calculatoare de tip Workstations;

- ◆ Programe dedicate, care sunt adaptate pentru rezolvarea problemelor de câmp corespunzătoare unui anumit echipament electric, au mult mai puține facilități și nu necesită pentru rularea lor calculatoare deosebit de performante.

Programul conceput pentru analiza numerică a dispozitivelor electromagnetice ale pompelor magnetohidrodinamice de repulsie face parte din categoria programelor dedicate, putând fi rulat pe calculatoarele personale IBM PC/AT 486, care sunt accesibile unui cerc larg de utilizatori.

**5.2. ALGORITM DE ANALIZĂ NUMERICĂ CU METODA ELEMENTELOR
FINITE A CÂMPULUI MAGNETIC INDUCTOR ȘI A CÂMPULUI
TERMIC AL DISPOZITIVELOR ELECTROMAGNETICE DE
VEHICULARE A LICHIDELOR ELECTROCONDUCTOARE**

Algoritmul de analiză numerică cu metoda elementelor finite a câmpului magnetic inductor și a câmpului termic al dispozitivelor electromagnetice de vehiculare a lichidelor electroconductoare (algoritm denumit MEF-DEM-1) are următoarea structură:



5.2.1. Formularea problemei și discretizarea domeniului de analiză

Formularea unei probleme ingineresti constituie prima și cea mai importantă etapă a rezolvării ei. De modul în care este formulată problema și de ipotezele de lucru care se aleg depinde întregul proces de rezolvare a ei și respectiv de interpretare a rezultatelor. În esență, formularea unei probleme înseamnă specificarea tipului de problemă, a ipotezelor de lucru adoptate și a condițiilor inițiale și la limită care se pun.

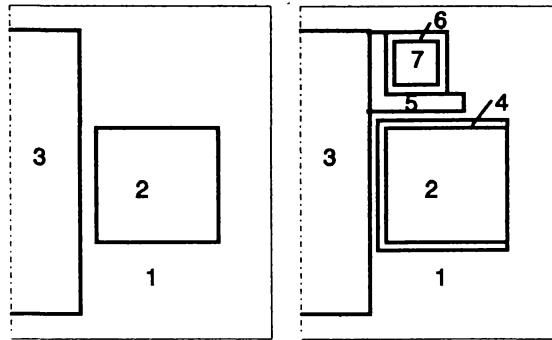
Ipotezele de lucru se referă în principal la geometria corpului analizat, la proprietățile materialelor folosite, la domeniul de variație al principalelor mărimi de câmp investigate și, în sfârșit, la regimul de funcționare al sistemului dat.

În cazul dispozitivelor electromagnetice, ale pompelor magnetohidrodinamice de repulsie, analiza cu MEF a câmpului magnetic inductor și a câmpului termic are drept scop: calcularea distribuției câmpului magnetic creat de bobina inductoare, alimentată în curent alternativ monofazat, calcularea distribuției câmpului termic și calcularea unor mărimi electrice și termice derivate (intensitatea câmpului magnetic, inducția magnetică, fluxuri magnetice, fluxuri termice etc.).

Analiza cu MEF a câmpului magnetic inductor se va efectua la momentul $\omega t = \frac{\pi}{2}$, când valorile inducției magnetice în diferite puncte ale miezului feromagnetic, întrefierului și bobinei inductoare sunt maxime.

În ceea ce privește analiza cu MEF a câmpului termic, în bobină și miezul feromagnetic, aceasta se execută pentru cazul regimului staționar al câmpului termic.

În cazul dispozitivelor electromagnetice, de vehiculare a lichidelor electroconductoare, prevăzute cu miezuri feromagnetice având forma și dimensiunile din fig.3.8.a. și b. se vor utiliza pentru analiza numerică cu MEF modelele fizice simplificate reprezentate în fig.5.1.



Cazul câmpului magnetic

Cazul câmpului termic

Fig.5.1. Model fizic simplificat pentru analiza numerică cu MEF a dispozitivelor electromagnetice de vehiculare a lichidelor electroconductoare, prevăzute cu miezuri feromagnetice având forma și dimensiunile din fig.3.8.a. și b. 1-regiunea de aer; 2-regiunea înfășurării bobinei; 3-regiunea miezului feromagnetic; 4-regiunea carcasei bobinei; 5-regiunea izolației termice; 6-regiunea pereților canalului de curgere; 7-regiunea lichidului electroconductor.

În mod similar, dispozitivelor electromagnetice de vehiculare a lichidelor electroconductoare prevăzute cu miezuri feromagnetice având forma și dimensiunile din fig.3.8.c. și d. li se vor asocia, în vederea analizei numerice cu MEF, modelele fizice simplificate reprezentate în fig.5.2.

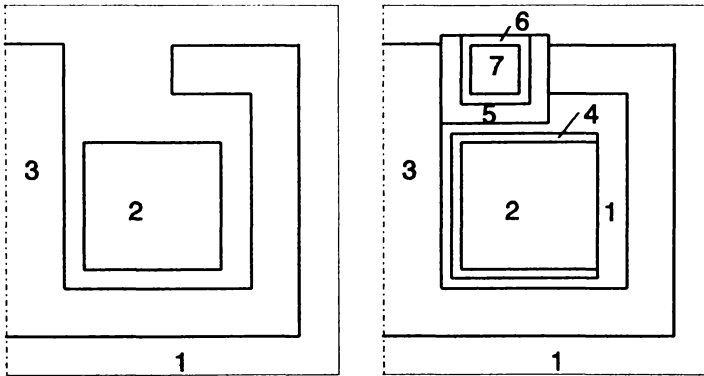
Aceste modele fizice simplificate s-au obținut prin:

a) idealizarea geometriei corpului original, în scopul reducerii complexității configurației geometrice a corpului original și pentru a micșora efortul computațional al problemei;

b) neglijarea elementelor constructive care nu influențează semnificativ distribuția și valoarea câmpului magnetic inductor, respectiv a câmpului termic.

c) modelarea simplificată a proprietăților de material. În cazul problemei de analiză a câmpului magnetic inductor vom avea de modelat trei tipuri de materiale: aerul, materialele conductoare din punct de vedere electric și materialele

magnetice. Fiecare regiune, care modelează un anumit material, va avea un anumit cod de material, iar bobina va fi modelată ca având o secțiune omogenă, parcursă de o densitate de curent constantă calculată în funcție de curentul din bobină, numărul de spire și aria secțiunii bobinei. În ceea ce privește problema de analiză a câmpului termic, se stabilesc șapte regiuni pentru a modela diversele materiale, care sunt: aerul, materialele magnetice, materialul carcasi bobinei inductoare, materialele înfășurării bobinei inductoare, materialul izolației termice, materialul peretelui canalului de curgere și lichidul electroconductor.



Cazul câmpului magnetic

Cazul câmpului termic

Fig.5.2. Model fizic simplificat pentru analiza numerică cu MEF a dispozitivelor electromagnetice de vehiculare a lichidelor electroconductoare, prevăzute cu miezuri feromagnetice având forma și dimensiunile din fig.3.8.c. și d. 1-regiunea de aer; 2-regiunea înfășurării bobinei; 3-regiunea miezului feromagnetic; 4-regiunea carcasi bobinei; 5-regiunea izolației termice; 6-regiunea pereților canalului de curgere; 7-regiunea lichidului electroconductor.

Precizăm, de asemenea, că analiza cu MEF a câmpului magnetic creat de bobina inductoare nu va lua în considerare influența (reacția) curenților induși de acesta în lichidul electroconductor, respectiv în miezul feromagnetic, asupra câmpului magnetic inițial.

Deoarece modelele fizice simplificată ale dispozitivelor electromagnetice de vehiculare a lichidelor electroconductoare au o simetrie plan meridiană, analiza numerică a câmpului magnetic inductor și a câmpului termic se va face într-un sistem de axe bidimensional, axele r-z din coordonate cilindrice. Axa z va trebui să coincidă cu axa de simetrie a dispozitivului electromagnetic.

De o importanță deosebită în analiza numerică cu MEF, a câmpului magnetic inductor și a câmpului termic al acestor dispozitive, este stabilirea zonelor de frontieră cu diferitele condiții la limită care apar:

♦ *Cazul analizei câmpului magnetic.* Din natura fizică a problemei rezultă că liniile de câmp nu vor trece prin axa de simetrie. Cu alte cuvinte, vectorul inducție magnetică \vec{B} va avea componenta normală zero de-a lungul acestei axe și prin urmare și potențialul magnetic vector poate fi considerat nul: $\vec{V}_m = 0$ (condiție de tip Dirichlet). De asemenea, considerând frontiera domeniului de analiză suficient de îndepărtată, de dispozitivul electromagnetic de vehiculare a lichidelor electroconductoare, încât să putem neglija câmpul magnetic în punctele respective, rezultă și pe frontieră condiții de tip Dirichlet $\vec{V}_m = 0$.

♦ *Cazul analizei câmpului termic.* Condițiile la limită pot fi de tip Dirichlet - atunci când se specifică temperatura, de tip Neumann - atunci când se specifică densitatea de suprafață a fluxului termic și de tip Cauchy - atunci când se specifică temperatura mediului ambiant și coeficientul de transmitere a căldurii prin convecție. Astfel, se impun condiții de tip Dirichlet în regiunea ocupată de lichidul electroconductor și pe frontiera domeniului de analiză cu excepția axei de simetrie a dispozitivului. De asemenea se impun condiții de tip Cauchy la suprafețele exterioare ale bobinei și miezului feromagnetic în contact cu aerul atmosferic.

După formularea problemei de analiză cu MEF se trece la discretizarea domeniului de analiză, adică la împărțirea acestuia

în elemente finite. Această operație se poate face manual sau cu ajutorul calculatorului. Trebuie precizat însă faptul că procesul de discretizare conduce la un volum mare de date geometrice privind nodurile și elementele finite, care constituie partea principală a datelor de intrare ale analizei numerice. Aceasta înseamnă timp mare de calcul și probabilitate foarte mare de a greși. Iar o greșeală în datele de intrare înseamnă o amplificare cu câteva ordine de mărime a timpului total de calcul irosit în rularea programelor de analiză până la diagnosticarea erorii.

Acestea, sunt câteva din argumentele care au condus la căutarea unor soluții de discretizare automată a domeniului de analiză cu ajutorul calculatorului. Dezvoltarea fără precedent a informaticii și a sistemelor de calcul din ultimii ani a condus la rezultate spectaculoase și în domeniul generării automate a structurii de elemente finite printr-o simbioză reușită între modelul numeric de analiză și grafica computațională interactivă.

Având în vedere acest lucru, în prezenta teză s-a optat, în cazul analizei numerice a câmpului magnetic inductor și a câmpului termic al dispozitivelor electromagnetice din componența pompelor magnetohidrodinamice de repulsie, pentru o discretizare semiautomată cu ajutorul unui program disponibil la Catedra de Electroenergetică a Facultății de Electrotehnică din Timișoara. Proiectantul trebuie să furnizeze calculatorului, prin intermediul programului, doar datele fizice și geometrice ale dispozitivului electromagnetic precum și finețea discretizării, iar calculatorul va genera rețeaua de discretizare cu toate datele aferente. Elementele finite utilizate pentru generarea rețelei de discretizare sunt elementele finite triunghiulare cu trei noduri. Modul în care se efectuează discretizarea unui domeniu bidimensional cu elemente finite triunghiulare cu trei noduri este descris (ca principiu) în diverse lucrări din literatura de specialitate [85, 87, 97, 106, 139, 90].

5.2.2. Deducerea ecuațiilor elementale

Ecuațiile elementale sunt ecuațiile care descriu comportarea materialului sau mediului în cuprinsul unui element finit. Ele alcătuiesc un sistem de ecuații al elementului finit. Numărul ecuațiilor sistemului este egal cu numărul gradelor de libertate pe element.

Metodele ce pot fi utilizate pentru deducerea ecuațiilor elementale sunt: metoda directă, metoda reziduurilor (Galerkin), metoda variațională și metoda bilanțului energetic. Dintre aceste metode cea mai folosită este metoda variațională, aceasta fiind și metoda aleasă în prezenta lucrare pentru analiza cu elemente finite a câmpului magnetic și a câmpului termic la dispozitivele electromagnetice de vehiculare a lichidelor electroconductoare [45, 85, 90, 112].

Potrivit calculului variațiunilor, rezolvarea unei ecuații diferențiale într-un domeniu dat și condiții la limită date este echivalentă cu minimizarea în acel domeniu a unei funcționale corespunzătoare ecuației diferențiale și condițiilor la limită date. Specific pentru metoda elementelor finite este faptul că minimizarea funcționalei se face pe fiecare element finit din cadrul domeniului analizat.

a) Cazul câmpului magnetic

Să considerăm un câmp magnetic staționar plan meridian, într-un domeniu D cu condiții Dirichlet omogene pe frontieră, (fig.5.3.a).

Presupunând că elemente finite diferite au permeabilități magnetice diferite, dar pentru un anumit element finit mediul este omogen (μ_t), ecuația potențialului magnetic vector este:

$$\Delta \bar{V}_{mt} + \mu_t \cdot \bar{J}_1 = 0 \quad (5.1)$$

Deoarece potențialul magnetic vector \bar{V}_{mt} și densitatea de curent \bar{J}_1 au numai componente după axa $O\varphi$:

$$\begin{aligned}\bar{V}_{mt} &= V_{mt\varphi} \cdot \bar{u}_{\varphi} = V_{mt} \cdot \bar{u}_{\varphi} \\ \bar{J}_1 &= J_{1\varphi} \cdot \bar{u}_{\varphi} = J_1 \cdot \bar{u}_{\varphi}\end{aligned}\quad (5.2)$$

ecuația (5.1) devine:

$$\Delta V_{mt} + \mu_t \cdot J_1 = 0 \quad (5.3)$$

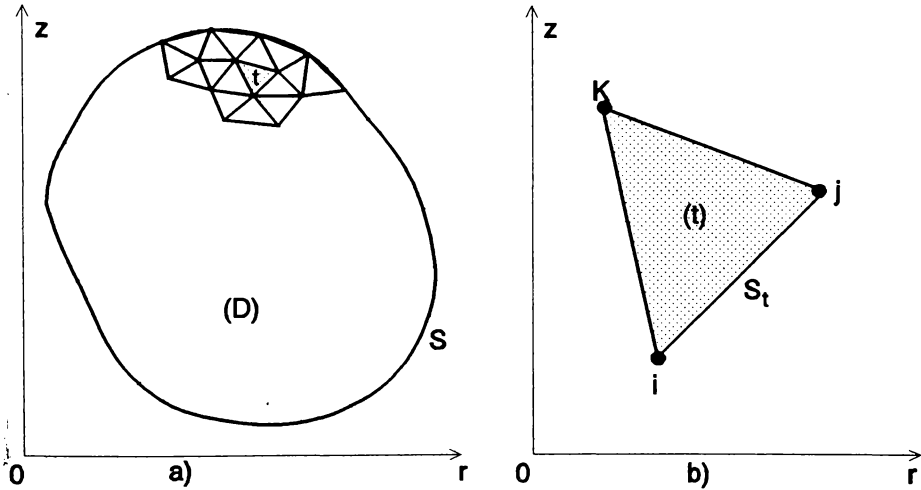


Fig.5.3. a) Domeniu de câmp discretizat în elemente finite.
b) Element finit triunghiular cu trei noduri.

Funcția necunoscută $V_{mt}(r, z)$ se obține prin minimizarea funcționalei [45, 73, 110]:

$$\mathcal{F}_t = \int_{S_t} \left[\frac{1}{2\mu_t} (\nabla V_{mt})^2 - J_1 \cdot V_{mt} \right] \cdot dS \quad (5.4)$$

Dar:

$$(\nabla V_{mt})^2 = \left(\frac{\partial V_{mt}}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_{mt}}{\partial z} \right)^2, \quad (5.5)$$

$$dS = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \cdot dz, \quad (5.6)$$

iar r se poate aproxima și cu valoarea sa medie pe elementul finit (t) considerat:

$$r = \frac{r_i + r_j + r_k}{3} \quad (5.7)$$

În aceste condiții, pe elementul finit (t), r se poate considera constant, iar funcționala \mathcal{F}_t devine:

$$\begin{aligned} \mathcal{F}_t &= 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \int_{S_t} \left\{ \frac{1}{2 \cdot \mu_t} \cdot \left[\left(\frac{\partial V_{mt}}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_{mt}}{\partial z} \right)^2 \right] - J_1 \cdot V_{mt} \right\} \cdot dr \cdot dz = \\ &= 2 \cdot \pi \cdot \int_{S_t} \left\{ \frac{1}{2 \cdot \mu_t \cdot r} \cdot \left[\left(\frac{\partial (r \cdot V_{mt})}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial (r \cdot V_{mt})}{\partial z} \right)^2 \right] - J_1 \cdot (r \cdot V_{mt}) \right\} \cdot dr \cdot dz \\ &= 2 \cdot \pi \cdot \int_{S_t} \left\{ \frac{1}{2 \cdot \mu_t \cdot r} \cdot \left[\left(\frac{\partial V_{mt}^*}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_{mt}^*}{\partial z} \right)^2 \right] - J_1 \cdot V_{mt}^* \right\} \cdot dr \cdot dz \quad (5.8) \end{aligned}$$

în care s-a introdus $V_{mt}^* = r \cdot V_{mt}$ potențialul magnetic vector modificat.

Se aproximează acum funcția potențială $V_{mt}^*(r, z)$, pentru un element finit, printr-o expresie polinomială. Deoarece elementele finite sunt de dimensiuni suficient de mici, se poate admite că funcția potențială $V_{mt}^*(r, z)$ variază liniar cu r și z , ceea ce corespunde unei aproximări printr-un polinom de gradul întâi. În fig.5.3.b. este reprezentat un element finit triunghiular oarecare (t), având vârfurile i , j și k , de coordonate $P_i(r_i, z_i)$, $P_j(r_j, z_j)$ și $P_k(r_k, z_k)$. Pentru un punct oarecare P din interiorul elementului finit considerat (t), funcția

potențială $V_{mt}^*(r, z)$ se poate scrie în acest caz sub forma:

$$V_{mt}^* = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot r + \alpha_3 \cdot z = [1 \quad r \quad z] \cdot \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

Particularizând ecuația (5.9) pentru nodurile i, j, K ale elementului finit (t) rezultă:

$$\begin{bmatrix} V_{mi}^* \\ V_{mj}^* \\ V_{mK}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & r_i & z_i \\ 1 & r_j & z_j \\ 1 & r_K & z_K \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

Rezolvând sistemul de ecuații (5.10) se obțin expresiile coeficienților α_1 , α_2 și α_3 . Se înlocuiesc apoi aceste expresii în relația (5.9) și rezultă:

$$V_{mt}^* = [1 \quad r \quad z] \cdot \begin{bmatrix} 1 & r_i & z_i \\ 1 & r_j & z_j \\ 1 & r_K & z_K \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_{mi}^* \\ V_{mj}^* \\ V_{mK}^* \end{bmatrix} = f_{ti} \cdot V_{mi}^* + f_{tj} \cdot V_{mj}^* + f_{tK} \cdot V_{mK}^* \quad (5.11)$$

unde f_{ti} , f_{tj} și f_{tK} sunt funcțiile de formă ale elementului finit triunghiular (t) și au expresiile:

$$\begin{cases} f_{ti} = \frac{1}{2 \cdot S_t} \cdot (a_i + b_i \cdot r + c_i \cdot z) \\ f_{tj} = \frac{1}{2 \cdot S_t} \cdot (a_j + b_j \cdot r + c_j \cdot z) \\ f_{tK} = \frac{1}{2 \cdot S_t} \cdot (a_K + b_K \cdot r + c_K \cdot z) \end{cases} \quad (5.12)$$

Este evident că dacă punctul P se găsește într-un nod (de ex. i), funcția de formă corespunzătoare (f_{ti}) este egală cu 1, iar celelalte funcții de formă sunt nule ($f_{tj} = f_{tK} = 0$).

În relațiile (5.12) S_t reprezintă aria elementului finit (t), iar coeficienții $a_i, b_i, c_i, a_j, b_j, c_j, a_K, b_K$ și c_K au expresiile:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_i = r_j \cdot z_K - r_K \cdot z_j \\ b_i = z_j - z_K \\ c_i = r_K - r_j \\ a_j = r_K \cdot z_i - r_i \cdot z_K \\ b_j = z_K - z_i \\ c_j = r_i - r_K \\ a_K = r_i \cdot z_j - r_j \cdot z_i \\ b_K = z_i - z_j \\ c_K = r_j - r_i \end{array} \right. \quad (5.13)$$

Derivatele parțiale ale funcției potențial $V_{mt}^*(r, z)$ în raport cu coordonatele r și z sunt:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_{mt}^*}{\partial r} &= \left[\frac{\partial f_{ti}}{\partial r} \quad \frac{\partial f_{tj}}{\partial r} \quad \frac{\partial f_{tK}}{\partial r} \right] \cdot \begin{bmatrix} V_{mi}^* \\ V_{mj}^* \\ V_{mK}^* \end{bmatrix} = \\ &= \frac{1}{2 \cdot S_t} \cdot (b_i \cdot V_{mi}^* + b_j \cdot V_{mj}^* + b_K \cdot V_{mK}^*) = \text{const.} \end{aligned} \quad (5.14)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_{mt}^*}{\partial z} &= \left[\frac{\partial f_{ti}}{\partial z} \quad \frac{\partial f_{tj}}{\partial z} \quad \frac{\partial f_{tK}}{\partial z} \right] \cdot \begin{bmatrix} V_{mi}^* \\ V_{mj}^* \\ V_{mK}^* \end{bmatrix} = \\ &= \frac{1}{2 \cdot S_t} \cdot (c_i \cdot V_{mi}^* + c_j \cdot V_{mj}^* + c_K \cdot V_{mK}^*) = \text{const.} \end{aligned} \quad (5.15)$$

Notând matricea derivatelor parțiale ale funcției potențial $V_{mt}^*(r, z)$ cu:

$$[d] = \begin{bmatrix} \frac{\partial V_{mt}^*}{\partial r} \\ \frac{\partial V_{mt}^*}{\partial z} \end{bmatrix} = \frac{1}{2 \cdot S_t} \cdot \begin{bmatrix} b_i & b_j & b_K \\ c_i & c_j & c_K \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{mi}^* \\ V_{mj}^* \\ V_{mK}^* \end{bmatrix} = [B_t] \cdot [V_{mt}^*] \quad (5.16)$$

funcționala pe elementul finit (t) devine:

$$\begin{aligned} \mathcal{F}_t &= \frac{2 \cdot \pi}{2 \cdot \mu_t \cdot I} \cdot \int_{S_t} [d]^T \cdot [d] \cdot dr \cdot dz - 2 \cdot \pi \cdot \int_{S_t} J_1 \cdot V_{mt}^* \cdot dr \cdot dz = \\ &= \frac{2 \cdot \pi}{2 \cdot \mu_t \cdot I} \cdot \int_{S_t} [V_{mt}^*]^T [B_t]^T \cdot [B_t] \cdot [V_{mt}^*] \cdot dr \cdot dz - \\ &\quad - 2 \cdot \pi \cdot \int_{S_t} J_1 \cdot [f_t] \cdot [V_{mt}^*] \cdot dr \cdot dz \end{aligned} \quad (5.17)$$

În relația (5.17) matricile $[V_{mt}^*]^T$ și $[B_t]^T$ sunt transpusele matricilor $[V_{mt}^*]$ și respectiv $[B_t]$, iar matricea

$$[f_t] = [f_{ti} \quad f_{tj} \quad f_{tK}] \quad (5.18)$$

este matricea funcțiilor de formă ale elementului triunghiular finit (t).

Funcționala \mathcal{F}_t s-a transformat, prin operațiile efectuate, într-o funcție având drept variabile potențialele magnetice V_{mi}^* , V_{mj}^* și V_{mK}^* , care formează matricea $[V_{mt}^*]$. Minimizarea expresiei (5.17) se obține anulând derivata acestei expresii în raport cu matricea $[V_{mt}^*]$:

$$\frac{\partial \mathcal{F}_t}{\partial [V_{mt}^*]} = 0 \quad (5.19)$$

sau

$$\begin{aligned} \frac{2 \cdot \pi}{2 \cdot \mu_t \cdot I} \cdot \int_{S_t} 2 \cdot [B_t]^T \cdot [B_t] \cdot [V_{mt}^*] \cdot dr \cdot dz - \\ - 2 \cdot \pi \cdot \int_{S_t} J_1 \cdot [f_t]^T \cdot dr \cdot dz = 0 \end{aligned} \quad (5.20)$$

Dacă notăm:

$$[k_t] = \frac{2 \cdot \pi}{2 \cdot \mu_t \cdot r} \cdot \int_{S_t} 2 \cdot [B_t]^T \cdot [B_t] \cdot dr \cdot dz =$$

$$= \frac{\pi}{2 \cdot \mu_t \cdot r \cdot S_t^2} \cdot \begin{bmatrix} b_i^2 + c_i^2 & b_i \cdot b_j + c_i \cdot c_j & b_i \cdot b_K + c_i \cdot c_K \\ b_j \cdot b_i + c_j \cdot c_i & b_j^2 + c_j^2 & b_j \cdot b_K + c_j \cdot c_K \\ b_K \cdot b_i + c_K \cdot c_i & b_K \cdot b_j + c_K \cdot c_j & b_K^2 + c_K^2 \end{bmatrix} \quad (5.21)$$

și

$$[p_t] = 2 \cdot \pi \cdot \int_{S_t} J_1 \cdot [f_t]^T \cdot dr \cdot dz = 2 \cdot \pi \cdot J_1 \begin{bmatrix} \frac{S_t}{3} \\ \frac{S_t}{3} \\ \frac{S_t}{3} \end{bmatrix} \quad (5.22)$$

rezultă un sistem de 3 ecuații cu 3 necunoscute, corespunzător elementului finit triunghiular (t), de forma:

$$[k_t] \cdot [V_{mt}^*] = [p_t] \quad (5.23)$$

unde:

- $[k_t]$ este matricea caracteristicilor fizico-geometrice ale materialului elementului finit triunghiular (t);
- $[V_{mt}^*]$ - matricea funcțiilor nodale necunoscute pe elementul finit triunghiular (t);
- $[p_t]$ - matricea încărcărilor magnetice pe elementul finit triunghiular (t).

Pentru calculul integralelor ce apar în relația (5.22) s-a utilizat formula lui Holand - Bell [106, 112]:

$$\int_{S_t} (f_{ti})^u \cdot (f_{tj})^v \cdot (f_{tK})^w \cdot dS = \frac{u! \cdot v! \cdot w!}{(u+v+w+2)!} \cdot 2 \cdot S_t \quad (5.24)$$

în care u , v și w sunt numere naturale.

b) Cazul câmpului termic

Să considerăm un câmp termic staționar plan meridian într-un domeniu D discretizat în elemente finite, care au forma unui tor de diametru $2 \cdot r$ și de secțiune transversală triunghiulară (vezi fig.5.4.a).

În acest caz, temperatura θ nu variază în timp $\left(\frac{\partial \theta}{\partial t} = 0\right)$ și nici în spațiu după axa φ $\left(\frac{\partial \theta}{\partial \varphi} = 0\right)$. Variația temperaturii în interiorul domeniului D după axele r și z este descrisă de ecuația lui Poisson, sau ecuația diferențială a conducției staționare a căldurii [127, 80], căreia i se asociază anumite condiții la limită.

Temperatura $\theta(r, z)$ nu este însă o funcție continuă pe tot domeniul D ci numai pe cuprinsul unui element finit. Prin urmare, rezolvarea (integrarea) ecuației lui Poisson în condiții la limită date se face pe elemente finite și potrivit calculului variațiunilor este echivalentă cu minimizarea următoarei funcționale:

$$\mathcal{F}_t = \int_{V_t} \frac{1}{2} \left[\lambda_{rt} \left(\frac{\partial \theta_t}{\partial r} \right)^2 + \lambda_{zt} \left(\frac{\partial \theta_t}{\partial z} \right)^2 \right] \cdot dV - \int_{V_t} P_{vt} \cdot \theta_t \cdot dV - \int_{S_{1t}} q_t \cdot \theta_t \cdot dS + \int_{S_{2t}} \alpha_t \cdot \left(\frac{\theta_t^2}{2} - \theta_t \cdot \theta_a \right) \cdot dS \quad (5.25)$$

în care:

θ_t reprezintă temperatura corespunzătoare elementului finit toroidal (t), în °C;

λ_{rt} și λ_{zt} - conductivitățile termice după direcția r și respectiv z pe cuprinsul elementului finit (t), în W/m·°C;

P_{vt} - puterea dezvoltată în unitatea de volum pe cuprinsul elementului finit (t), în W/m³;

- q_t - densitatea fluxului termic pentru elementul finit (t), în W/m^2 ;
- α_t - transmisivitatea termică corespunzătoare elementului finit (t), în $W/m^2 \cdot ^\circ C$;
- θ_a - temperatura mediului ambiant, în $^\circ C$;
- V_t - volumul elementului finit toroidal (t);
- S_{1t} - suprafața cu schimb de căldură prin conducție corespunzătoare elementului finit (t);
- S_{2t} - suprafața cu schimb de căldură prin convecție corespunzătoare elementului finit (t).

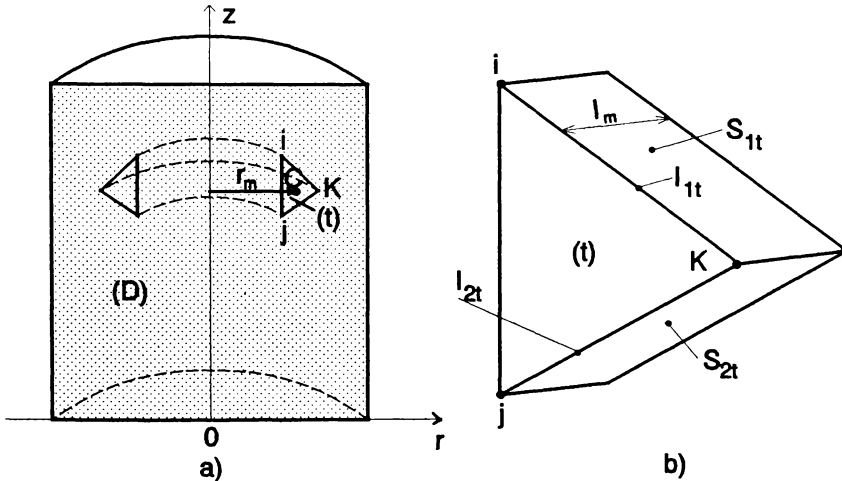


Fig.5.4. a) Domeniu discretizat în elemente finite toroidale; b) Element finit triunghiular plan de grosime l_m , cu schimb de căldură prin conducție (S_{1t}) și prin convecție (S_{2t}).

Convenția pentru semnele lui p_t , q_t și α_t este următoarea: p_t este pozitiv dacă sursele interioare debitează căldură și negativ dacă absorb căldură; q_t este pozitiv dacă are sensul de la mediul ambiant spre elementul finit (t) și negativ în caz contrar; α_t este pozitiv pe suprafețele elementului finit (t) care cedează

căldură mediului ambiant și negativ pe cele care absorb căldură de la mediul ambiant.

Temperatura $\theta_t(x, z)$ pe elementul finit (t) considerat (vezi fig.5.4.b) se poate scrie ca o funcție de temperaturile nodurilor i, j și K :

$$\theta_t = [f_{ti} \quad f_{tj} \quad f_{tK}] \cdot \begin{bmatrix} \theta_i \\ \theta_j \\ \theta_K \end{bmatrix} = [f_t] \cdot [\theta_t] \quad (5.26)$$

unde: $[f_t]$ este matricea funcțiilor de formă ale elementului finit (t), iar $[\theta_t]$ este matricea temperaturilor nodurilor elementului finit (t).

Notând matricea derivatelor parțiale ale funcției $\theta_t(x, z)$ cu:

$$[d] = \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta_t}{\partial r} \\ \frac{\partial \theta_t}{\partial z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_{ti}}{\partial r} & \frac{\partial f_{tj}}{\partial r} & \frac{\partial f_{tK}}{\partial r} \\ \frac{\partial f_{ti}}{\partial z} & \frac{\partial f_{tj}}{\partial z} & \frac{\partial f_{tK}}{\partial z} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \theta_i \\ \theta_j \\ \theta_K \end{bmatrix} = [B_t] \cdot [\theta_t] \quad (5.27)$$

și matricea conductivităților termice pe cuprinsul elementului finit (t) cu:

$$[\lambda_t] = \begin{bmatrix} \lambda_{rt} & 0 \\ 0 & \lambda_{zt} \end{bmatrix} \quad (5.28)$$

funcționala corespunzătoare elementului finit (t) devine:

$$\begin{aligned} \mathcal{F}_t = & \int_{V_t} \frac{1}{2} [\theta_t]^T \cdot [B_t]^T \cdot [\lambda_t] \cdot [B_t] \cdot [\theta_t] \cdot dV - \\ & - \int_{V_t} p_{vt} \cdot [f_t] \cdot [\theta_t] \cdot dV - \int_{S_{1t}} q_t \cdot [f_t] \cdot [\theta_t] \cdot dS + \\ & + \int_{S_{2t}} \frac{1}{2} \alpha_t ([f_t] \cdot [\theta_t])^2 \cdot dS - \int_{S_{2t}} \alpha_t \theta_a \cdot [f_t] \cdot [\theta_t] \cdot dS \end{aligned} \quad (5.29)$$

Minimizarea expresiei (5.29) se face anulând derivata acestei expresii în raport cu matricea $[\theta_t]$:

$$\frac{\partial \mathcal{F}_t}{\partial [\theta_t]} = 0 \quad (5.30)$$

sau:

$$\begin{aligned} \int_{V_t} [B_t]^T \cdot [\lambda_t] \cdot [B_t] \cdot [\theta_t] \cdot dV - \int_{V_t} p_{vt} \cdot [f_t]^T \cdot dV - \int_{S_{1t}} q_t \cdot [f_t]^T \cdot dS + \\ + \int_{S_{2t}} \alpha_t \cdot [f_t]^T \cdot [f_t] \cdot [\theta_t] \cdot dS - \int_{S_{2t}} \alpha_t \cdot \theta_a \cdot [f_t]^T \cdot dS = 0 \end{aligned} \quad (5.31)$$

Dacă notăm:

$$\begin{aligned} [k_t] &= \int_{V_t} [B_t]^T \cdot [\lambda_t] \cdot [B_t] \cdot dV + \int_{S_{2t}} \alpha_t \cdot [f_t]^T \cdot [f_t] \cdot dS = \\ &= l_m \cdot \int_{S_t} [B_t]^T \cdot [\lambda_t] \cdot [B_t] \cdot dS + l_m \cdot \int_{I_{2t}} \alpha_t \cdot [f_t]^T \cdot [f_t] \cdot dl = \\ &= \frac{l_m}{4 \cdot S_t} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_{rt} \cdot b_i^2 + \lambda_{zt} \cdot c_i^2 & \lambda_{rt} \cdot b_i \cdot b_j + \lambda_{zt} \cdot c_i \cdot c_j & \lambda_{rt} \cdot b_i \cdot b_K + \lambda_{zt} \cdot c_i \cdot c_K \\ \lambda_{rt} \cdot b_j \cdot b_i + \lambda_{zt} \cdot c_j \cdot c_i & \lambda_{rt} \cdot b_j^2 + \lambda_{zt} \cdot c_j^2 & \lambda_{rt} \cdot b_j \cdot b_K + \lambda_{zt} \cdot c_j \cdot c_K \\ \lambda_{rt} \cdot b_K \cdot b_i + \lambda_{zt} \cdot c_K \cdot c_i & \lambda_{rt} \cdot b_K \cdot b_j + \lambda_{zt} \cdot c_K \cdot c_j & \lambda_{rt} \cdot b_K^2 + \lambda_{zt} \cdot c_K^2 \end{bmatrix} + \\ &+ l_m \cdot \alpha_t \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{l_{2t}}{3} & \frac{l_{2t}}{6} \\ 0 & \frac{l_{2t}}{6} & \frac{l_{2t}}{3} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5.32)$$

și

$$\begin{aligned}
 [p_t] &= \int_{V_t} p_{vt} [f_t]^T \cdot dV + \int_{S_{1t}} q_t [f_t]^T \cdot dS + \int_{S_{2t}} \alpha_t \theta_a [f_t]^T \cdot dS = \\
 &= l_m \int_{S_t} p_{vt} [f_t]^T \cdot dS + l_m \int_{l_{1t}} q_t [f_t]^T \cdot dl + l_m \int_{l_{2t}} \alpha_t \theta_a [f_t]^T \cdot dl = \\
 &= l_m \cdot p_{vt} \cdot \begin{bmatrix} \frac{S_t}{3} \\ \frac{S_t}{3} \\ \frac{S_t}{3} \end{bmatrix} + l_m \cdot q_t \cdot \begin{bmatrix} \frac{l_{1t}}{2} \\ 0 \\ \frac{l_{1t}}{2} \end{bmatrix} + l_m \cdot \alpha_t \theta_a \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{l_{2t}}{2} \\ \frac{l_{2t}}{2} \end{bmatrix} \quad (5.33)
 \end{aligned}$$

rezultă un sistem de 3 ecuații cu 3 necunoscute pentru elementul finit (t), de forma:

$$[k_t] \cdot [\theta_t] = [p_t] \quad (5.34)$$

în care:

- $[k_t]$ reprezintă matricea caracteristicilor fizico-geometrice ale materialului elementului finit (t);
- $[\theta_t]$ - matricea funcțiilor nodale (temperaturilor nodurilor) necunoscute pe elementul finit (t);
- $[p_t]$ - matricea încărcărilor termice pe elementul finit (t);

Pentru calculul integralelor ce apar în relațiile (5.32) și (5.33) s-au utilizat formulele lui Holand - Bell [106, 112], care sunt: formula (5.24) și formula

$$\int_{l_t} (f_{ti})^u \cdot (f_{tj})^v \cdot dl = \frac{u! \cdot v!}{(u+v+1)!} \cdot l_t \quad (5.35)$$

De asemenea, mărimile fizice caracteristice pentru elementul finit (t) și anume: p_{vt} , λ_{1t} , λ_{2t} , α_t , q_t , și θ_a s-au considerat

constante pe suprafața și pe laturile elementului finit, iar între elementele diferențiale de volum, de arie și de lungime s-au admis relațiile:

$$dV = l_m \cdot dS \quad (5.36)$$

și

$$dS = l_m \cdot dl \quad (5.37)$$

Grosimea l_m a elementului finit (t) s-a luat:

$$l_m = 2 \cdot \pi \cdot r_m = 2 \cdot \pi \cdot \frac{r_i + r_j + r_k}{3} \quad (5.38)$$

pentru evaluarea integralelor pe volumul V_t ,

$$l_m = 2 \cdot \pi \cdot \frac{r_i + r_k}{2} \quad (5.39)$$

pentru evaluarea integralei pe suprafața S_{1t} și

$$l_m = 2 \cdot \pi \cdot \frac{r_j + r_k}{2} \quad (5.40)$$

pentru evaluarea integralelor pe suprafața S_{2t} .

5.2.3. Asamblarea ecuațiilor elementale în sistemul general de ecuații (corespunzător structurii)

Asamblarea este un proces de reunire a elementelor finite și de sinteză a domeniului de analiză considerat. Pe plan geometric, rezultatul procesului de asamblare îl constituie refacerea domeniului, iar pe plan funcțional, obținerea modelului numeric global al corpului studiat.

Asamblarea elementelor finite se poate face în două moduri: după elemente sau după noduri. În primul caz, elementele finite

se iau unul câte unul, în ordinea crescândă a numerotării lor, iar în cel de-al doilea caz se iau nodurile globale ale sistemului unul câte unul și se asamblează elementele finite în jurul fiecărui nod. Indiferent de procedeul folosit, rezultatul final - modelul numeric global - este același.

În prezenta lucrare se utilizează asamblarea după elementele [85, 97, 139], care conduce la obținerea unui sistem de N_n ecuații cu N_n necunoscute (corespunzător tuturor celor N_n noduri ale rețelei de discretizare) de forma:

$$[K] \cdot [V_m^*] = [P] \quad (5.41)$$

în cazul analizei câmpului magnetic, sau

$$[K] \cdot [\theta] = [P] \quad (5.42)$$

în cazul analizei câmpului termic.

În relațiile (5.41) și (5.42) $[K]$ reprezintă matricea caracteristicilor fizico-geometrice ale materialului structurii, $[P]$ este matricea încărcărilor (magnetice respectiv termice) pe toată structura, iar $[V_m^*]$ și respectiv $[\theta]$ reprezintă matricea funcțiilor nodale necunoscute (ce sunt potențiale magnetice respectiv temperaturi) pentru întreaga structură.

Algoritmul general de asamblare al sistemului matricial global caracteristic metodei elementelor finite este următorul:

- ◆ Se inițializează termenii matricelor $[K]$ și $[P]$ cu zero.
- ◆ Se parcurg toate cele N_e elemente finite și pentru fiecare element "t":

- se calculează cei $3 \times 3 = 9$ termeni ai matricei elementale $[k_t]$ și cei 3 termeni ai matricei elementale $[p_t]$;

- se expandează cele două matrici elementale în matricile globale $[K]$ și $[P]$ adăugând fiecare termen k_{ij} la termenul K_{IJ} :

$$K_{IJ} = K_{IJ} + k_{ij}$$

$$i = 1, 2, 3 \quad I = CON^{(t)}(i) \quad (5.43)$$

$$j = 1, 2, 3 \quad J = CON^{(t)}(j)$$

și fiecare termen p_i la termenul P_I :

$$P_I = P_I + p_i$$

$$i = 1, 2, 3 \quad (5.44)$$

$$I = CON^{(t)}(i)$$

În relațiile (5.43) și (5.44) $CON^{(t)}(i)$ și $CON^{(t)}(j)$ sunt termeni ai matricii de conexiuni după elemente, corespunzătoare domeniului de analiză considerat (vezi fig.5.5.).

Tabloul CON			
Numărul elementului t	Numărul nodurilor elementului t		
1	$CON^{(1)}(1)$	$CON^{(1)}(2)$	$CON^{(1)}(3)$
2	$CON^{(2)}(1)$	$CON^{(2)}(2)$	$CON^{(2)}(3)$
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
Ne	$CON^{(Ne)}(1)$	$CON^{(Ne)}(2)$	$CON^{(Ne)}(3)$

Fig.5.5. Matricea de conexiuni după elemente a domeniului de analiză.

După parcurgerea algoritmului de mai sus, matricile $[K]$ și $[P]$ sunt asamblate, dar sistemul obținut nu este gata pentru a fi rezolvat, deoarece matricea $[K]$ este singulară (determinantul

ei este nul) atât timp cât condițiile la limită nu sunt incluse.

Implementarea condițiilor la limită se face, în general, în funcție de tipul de condiție la limită și de structura modelului numeric global. Astfel, în prezenta lucrare, unele condiții la limită și anume cele de tip Neumann și de tip Cauchy, au fost introduse în modelul numeric global încă din faza de derivare a modelului numeric elemental. Deci, înainte de a se trece la rezolvarea sistemului de ecuații mai trebuie încorporate în modelul numeric global numai condițiile la limită de tip Dirichlet. Introducerea lor se face astfel ca în sistemul matriceal final să se opereze cât mai puține modificări. Metoda utilizată pentru implementarea condițiilor Dirichlet este următoarea:

- ◆ se înmulțesc coeficienții diagonali aferenți valorilor nodale cunoscute cu un număr foarte mare, care depinde de echipamentul de calcul avut la dispoziție (de ex. 10^{15});

- ◆ se înlocuiesc coeficienții termenului liber corespunzător cu aceste valori modale cunoscute, înmulțite cu coeficienții diagonali și cu numărul ales.

Procedând astfel, se obține un sistem de ecuații redus care se poate rezolva:

$$[K'] \cdot [V_m^{*'}] = [P'] \quad (5.45)$$

respectiv:

$$[K'] \cdot [\theta'] = [P'] \quad (5.46)$$

5.2.4. Rezolvarea sistemului general de ecuații

În perioada inițială de dezvoltare a metodei elementelor finite, pentru rezolvarea sistemului de ecuații se utilizau metodele iterative Gauss-Seidel și Newton-Raphson. În prezent însă, în general, se apreciază că metodele iterative nu sunt competitive cu metodele directe, cu excepția unor cazuri speciale cum ar fi rezolvarea unor probleme tridimensionale de foarte mari

dimensiuni. Dintre metodele directe, o largă răspândire cunoaște metoda Gauss. Aceasta este de fapt și metoda utilizată în prezenta lucrare pentru rezolvarea sistemului general de ecuații obținut.

Algoritmul metodei Gauss constă în două faze succesive:

- ♦ faza inițială de eliminare a necunoscutelor, în cursul căreia matricele sunt modificate, matricea $[K']$ devenind triunghiular superioară;

- ♦ faza finală de rezolvare prin retrosubstituție.

Algoritmul metodei Gauss, modul de implementare pe calculator a acestui algoritm precum și programul de calcul corespunzător algoritmului sunt prezentați în detaliu în multe cărți de specialitate (de exemplu în [85]).

5.2.5. Calculul necunoscutelor secundare

Analiza numerică a dispozitivelor electromagnetice de vehiculare a lichidelor electroconductoare s-ar putea încheia după determinarea necunoscutelor primare (potențialul magnetic vector și respectiv temperatura).

Având în vedere însă faptul că, în cazul analizei câmpului magnetic, potențialul magnetic vector nu are o semnificație fizică prea evidentă, devine necesară efectuarea unor calcule suplimentare pentru determinarea necunoscutelor secundare: inducția magnetică, intensitatea câmpului magnetic, fluxuri magnetice etc.

În cazul analizei câmpului termic, deoarece temperatura are un sens fizic evident, nu sunt necesare (și nici nu se vor efectua) calcule suplimentare pentru determinarea unor necunoscute secundare, precum intensitățile fluxurilor termice.

Modalitățile de obținere a acestor necunoscute secundare (cu ajutorul calculatorului) sunt descrise de asemenea, pe larg, în literatura de specialitate [85, 106, 73].

5.3. PROGRAMELE DE ANALIZĂ NUMERICĂ CU METODA ELEMENTELOR FINITE A CÂMPULUI MAGNETIC ȘI A CÂMPULUI TERMIC AL DISPOZITIVELOR ELECTROMAGNETICE DE VEICULARE A LICHIDELOR ELECTROCONDUCTOARE

Pentru analiza numerică cu metoda elementelor finite a câmpului magnetic și a câmpului termic al dispozitivelor electromagnetice, din componența pompelor magnetohidrodinamice de repulsie, s-a optat pentru utilizarea produsului informatic ELCUT 3.0, în care s-au efectuat unele modificări.

În acest sens au fost eliminate anumite meniuri, menținându-se numai meniurile necesare rezolvării bidimensionale a problemelor de câmp magnetic staționar și problemelor de transfer conductiv de căldură, în regim staționar.

Pachetul de programe permite să se studieze (ca probleme bidimensionale) numai problemele plane și axial-simetrice, iar rețeaua de discretizare ce poate fi generată cuprinde maximum 500 de noduri.

Denumirea folosită, în prezenta lucrare, pentru acest pachet de programe este MEF-DEM-1. El poate fi rulat pe orice calculator IBM PC/AT 486, iar modul de apelare și modul de utilizare a acestui pachet de programe sunt descrise în capitolul 6 al tezei.

Pachetul de programe MEF-DEM-1 permite calculul unor parametri ai dispozitivelor electromagnetice de vehiculare a lichidelor electroconductoare mult mai precis decât prin metodele obișnuite (clasice). Analiza numerică efectuată (cu MEF-DEM-1) este rapidă, comodă din punct de vedere al utilizatorului și foarte utilă, mai ales prin prezentarea grafică a rezultatelor sub forma unor spectre de câmp magnetic și termic, cât și prin posibilitatea tipăririi la imprimantă a fișierelor cu rezultatele obținute.

5.4. APLICAȚII ȘI CONCLUZII

Cu ajutorul pachetului de programe MEF-DEM-1 s-a efectuat analiza numerică cu metoda elementelor finite a câmpului magnetic și a câmpului termic la dispozitivul electromagnetic de vehiculare a plumbului, având datele obținute în urma proiectării și optimizării proiectării cu ajutorul programelor PRODEM-D și OPTDEM (vezi paragrafele 3.5. și 4.4.).

Rezultatele analizei numerice a câmpului magnetic al acestui dispozitiv electromagnetic de vehiculare a plumbului, la momentul $\omega t = \pi/2$, sunt prezentate în fig.5.6., fig.5.7. și ANEXA 9.

În ceea ce privește analiza numerică a câmpului termic al acestui dispozitiv electromagnetic de vehiculare a plumbului, pentru cazul regimului staționar, ea conduce la rezultatele date în fig.5.8., fig.5.9. și ANEXA 9.

Din fig.5.6., fig.5.7. și ANEXA 9 rezultă că valoarea inducției magnetice în zona centrală a întrefierului este 0,303 T, iar valoarea maximă a inducției magnetice în miezului feromagnetic este 1,4 T. Aceste valori sunt apropiate de cele considerate în calculul de proiectare.

Privind fig.5.8., fig.5.9. și ANEXA 9 se poate observa că temperatura maximă în miezul feromagnetic este 92°C, iar temperatura maximă a bobinei este 91,5°C. Temperaturile obținute nu depășesc temperaturile maxime admisibile ale bobinei și miezului feromagnetic.

Analiza numerică efectuată ne-a permis să aflăm în detaliu solicitările magnetice și termice și în locurile greu accesibile unde nici experimental nu se pot măsura aceste solicitări. Mai mult, prin analiza numerică a câmpului magnetic și termic au putut fi luate în considerare: neomogenitățile și formele geometrice complexe ale subansamblelor dispozitivului electromagnetic, neliniaritatea permeabilității magnetice, anizotropia proprietăților fizice (valorile diferite ale conductivității termice după direcțiile r și z), toate tipurile de transmitere a căldurii din interiorul dispozitivului electromagnetic de vehiculare a plumbului și toate sursele de căldură.

Precizia rezultatelor ce se obțin cu MEF-DEM-1 depinde de calitatea datelor fizice și geometrice introduse, precum și de finețea discretizării.

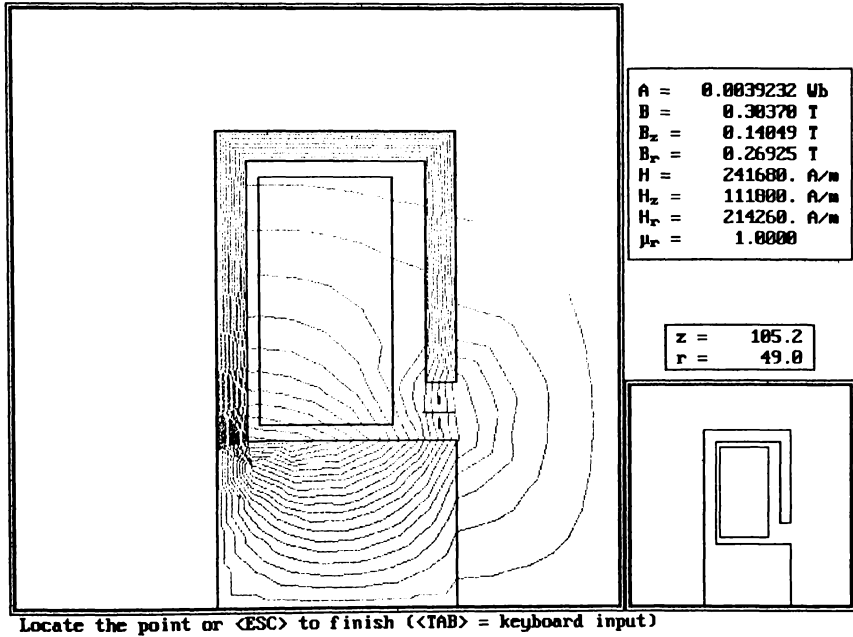


Fig.5.6. Spectrul câmpului magnetic, al unui dispozitiv electromagnetic din componența unei pompe magnetohidrodinamice de repulsie destinată vehiculării plumbului, la momentul $\omega t = \pi/2$.

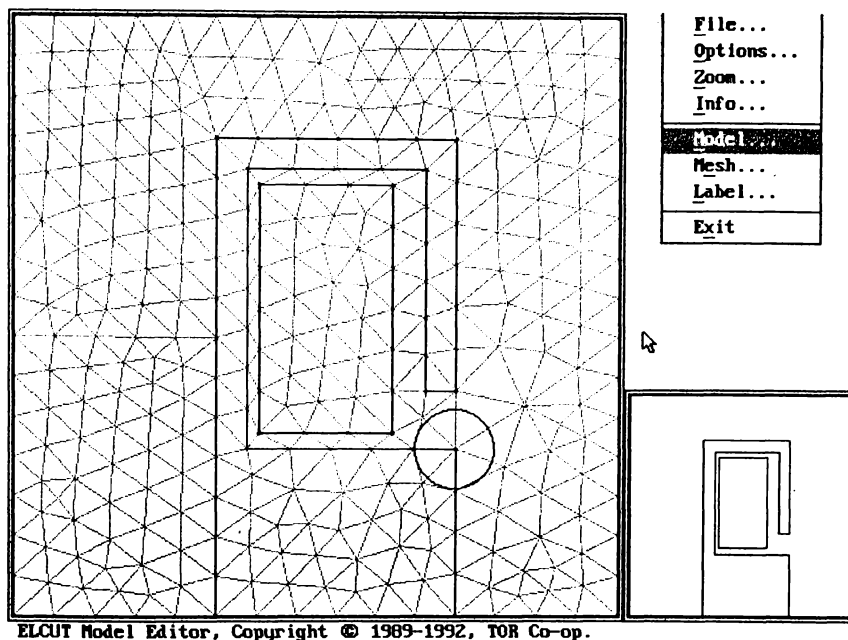


Fig.5.7. Rețeaua de discretizare corespunzătoare analizei numerice de câmp magnetic la momentul $\omega t = \pi/2$, la un dispozitiv electromagnetic din componenta unei pompe magnetohidrodinamice de repulsie destinată vehiculării plumbului.

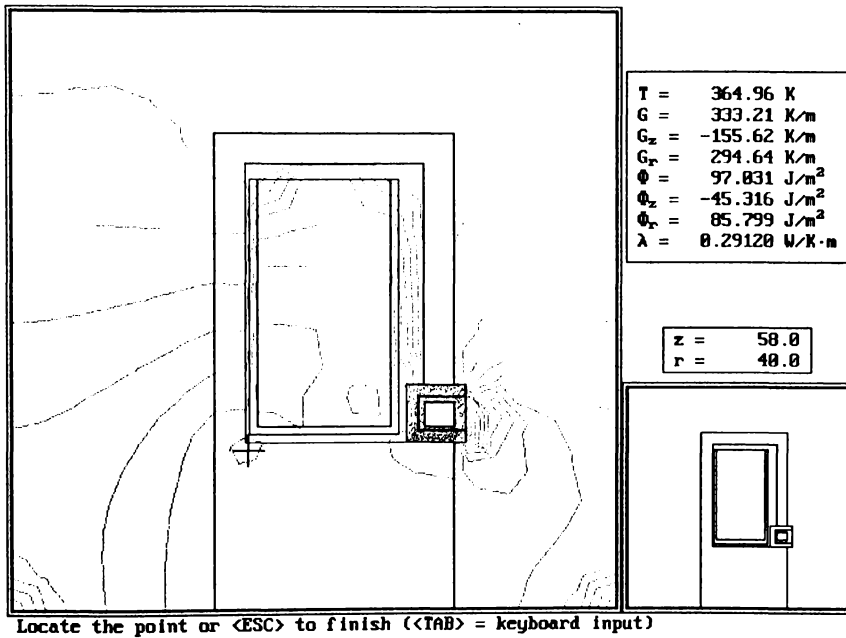


Fig.5.8. Spectrul câmpului termic, al unui dispozitiv electromagnetic din componența unei pompe magnetohidrodinamice de repulsie destinată vehiculării plumbului, în regim staționar.

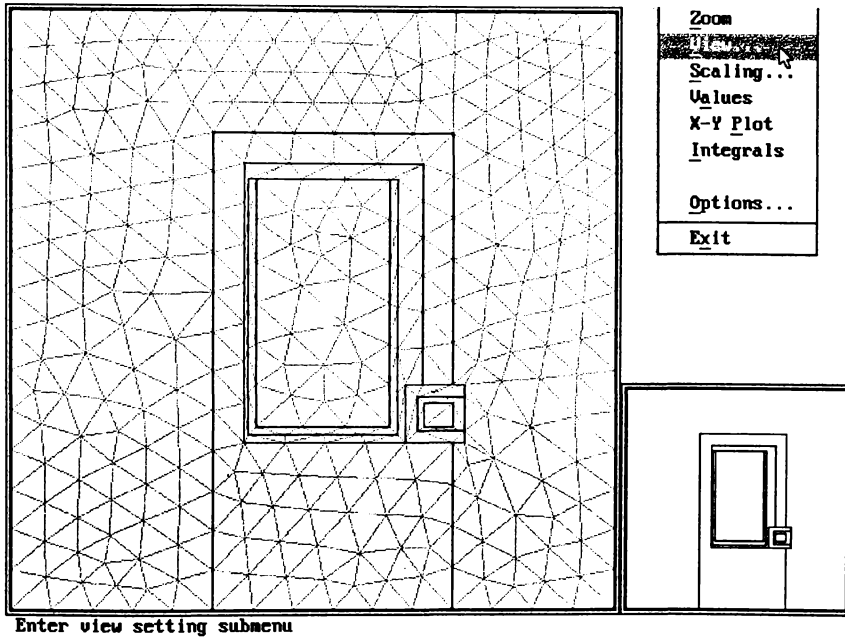


Fig.5.9. Rețeaua de discretizare corespunzătoare analizei numerice de câmp termic, în regim staționar, la un dispozitiv electromagnetic din componenta unei pompe magnetohidrodinamice de repulsie destinată vehiculării plumbului.

CAPITOLUL 6

**SISTEM DE PROGRAME DE PROIECTARE OPTIMALĂ
ȘI ANALIZĂ NUMERICĂ A DISPOZITIVELOR
ELECTROMAGNETICE DE VEHICULARE A
LICHIDELOR ELECTROCONDUCTOARE
(SPPADEM)**

6.1. STRUCTURA ȘI MODUL DE UTILIZARE A SPPADEM

Sistemul de programe de proiectare optimală și analiză numerică a dispozitivelor electromagnetice din componența pompelor magnetohidrodinamice de repulsie, denumit SPPADEM, s-a întocmit pornind de la produsul informatic MathCAD și pachetul de programe Elcut-3.0. În structura sa, sistemul de programe SPPADEM, păstrează o serie de meniuri și submeniuri ale produselor informatice menționate, alături de care s-au mai introdus și alte meniuri și submeniuri corespunzătoare aplicației date.

Meniurile și submeniurile proprii sistemului de programe creat sunt: "Calcul DEM", "PRODEM-A", "PRODEM-B", "PRODEM-C", "PRODEM-D", "OPTDEM", "Grafica DEM", "MEF-DEM-1", "DEMMAG", "DEMTER" și "Mefdem-prg".

Sistemul de programe SPPADEM se poate păstra pe 2 dischete de 2.0 Mb/2.0 Mo. Aceste dischete se copiază într-un subdirector al unui HardDisk și sistemul de programe SPPADEM se lansează de aici la darea comenzii DORU SPPADEM.

În urma apelării apare ecranul din fig.6.1. care conține pictogramele: "Calcul DEM", "Grafica DEM", "MEF-DEM-1" și "Mefdem-prg."

Pentru a rula programele de proiectare și optimizare a proiectării dispozitivelor electromagnetice de vehiculare a lichidelor electroconductoare se selectează aplicația "Calcul DEM" obținându-se ecranul din fig.6.2. Se dă apoi comanda "Calcul.exe", urmată de una din comenzile: "Load PRODEM-A", "Load PRODEM-B", "Load PRODEM-C", "Load PRODEM-D", "Load OPTDEM".

După apelarea oricăruia dintre programele de proiectare sau optimizare a proiectării dispozitivelor electromagnetice din componența pompelor magnetohidrodinamice de repulsie modul de lucru devine identic cu utilizarea unui program MathCAD.

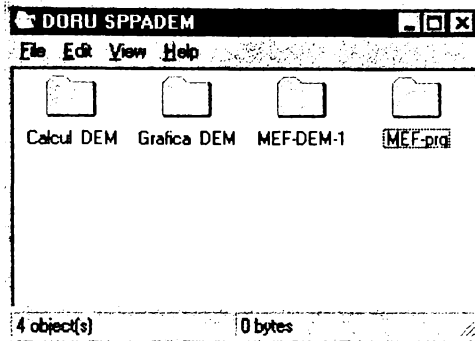


Fig.6.1. Fereastra aplicatiei SPPADEM.

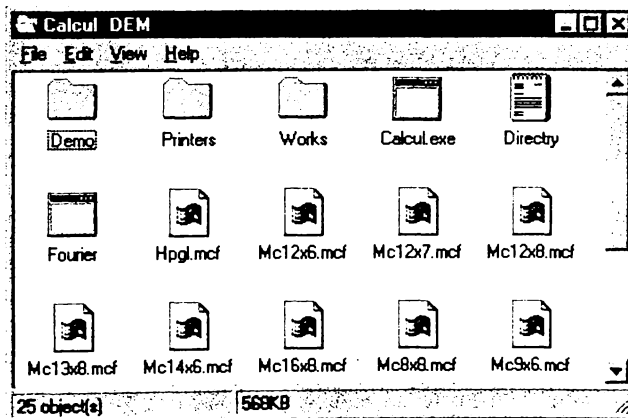


Fig.6.2. Fereastra aplicatiei Calcul DEM.

Pentru a rula programele de analiză numerică cu metoda elementelor finite a dispozitivelor electromagnetice de vehiculare a lichidelor electroconductoare, se selectează aplicația "MEF-DEM-1", deschizându-se astfel fereastra reprezentată în fig.6.3. De aici se apelează aplicația "MEF-DEM-exe" și se deschide o altă fereastră.

Aplicația "MEF-DEM-exe" are un meniu orizontal de tip "pulldown", adică un meniu în care fiecare opțiune corespunde unui alt meniu vertical.

Meniul "File" are comenzile din caseta afișată în fig.6.4. Semnificațiile acestor comenzi sunt următoarele:

- "New" - Creează o nouă problemă;
- "Open..." - Deschide o problemă existentă;
- "Save" - Salvează problema activă;
- "Save As..." - Salvează o copie a problemei active într-un fișer separat;
- "Exit" - Părăsește aplicația "MEF-DEM-exe" și permite salvarea problemelor.

Meniul "Edit" conține submeniurile din caseta reprezentată în fig.6.5., submeniuri care au următoarele semnificații:

- "Problem..." - Descrie problema de analiză numerică prin precizarea tipului de problemă, preciziei de calcul și sistemului de coordonate;
- "Geometry" - Modelează geometria și proprietățile de material corespunzătoare dispozitivului electromagnetic de studiat și generează automat rețeaua de discretizare cu finețea dorită de utilizator;
- "Data" - Introduce datele inițiale corespunzătoare problemei de rezolvat;

Meniul "Rezults" are în componența lui comanda "Solve Problem" și submeniul "Analyze", prin a căror apelare se rezolvă și respectiv se analizează problema (vezi fig.6.6.). Cu ajutorul acestui meniu este posibilă calcularea necunoscutelor primare,

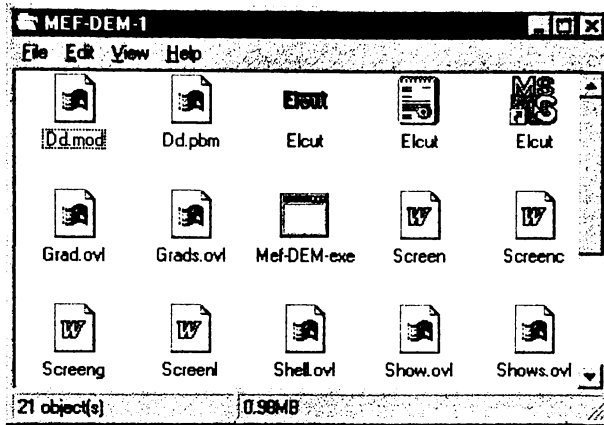


Fig.6.3.Fereastra aplicatiei MEF - DEM - 1.

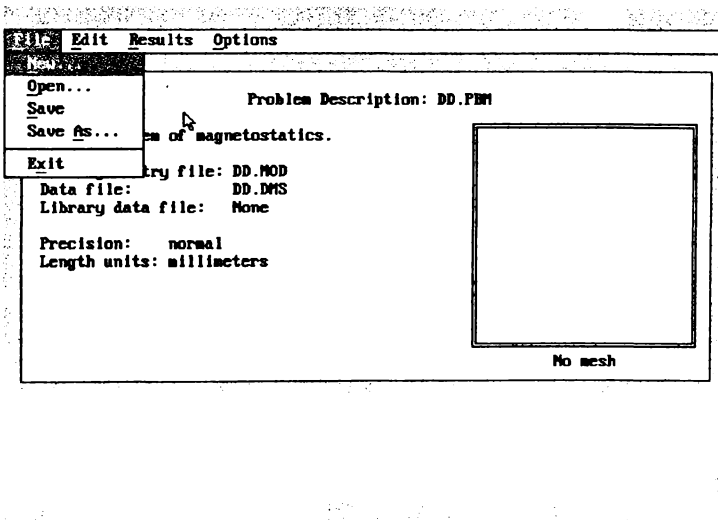


Fig.6.4. Caseta meniului File al aplicatiei MEF-DEM- exe.

a unor mărimi diferențiale de câmp și a unor mărimi globale (integrale), iar rezultatele pot fi afișate sub formă numerică sau grafică.

Meniul "Options" cuprinde comenzile din caseta afișată în fig.6.7., și anume:

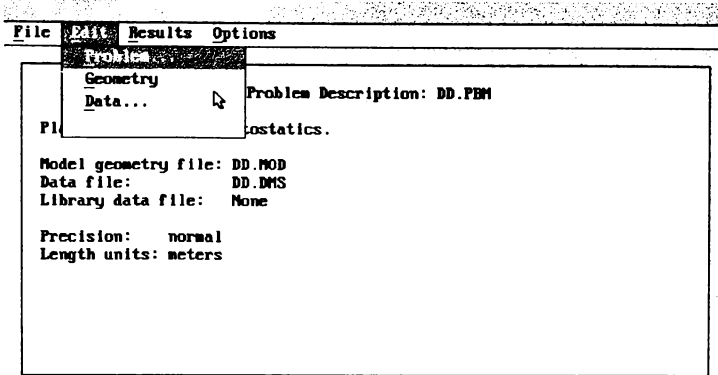
- "Length Units" - Selectează unitățile de măsură;
- "Colors" - Selectează schema de culori cu care se va trasa rețeaua de discretizare și spectrul liniilor de câmp magnetic sau termic.

După revenirea în meniul principal (fig.6.1), prin selectarea aplicației "Grafica DEM" se deschide fereastra prezentată în fig.6.8., de unde se poate activa aplicația "DESDEM-exe". Utilizând aplicația "DESDEM-exe", proiectantul are la dispoziție pe ecranul monitorului o serie de schițe în care se prezintă forma și dimensiunile geometrice ale miezurilor feromagnetice și ale bobinelor ce pot fi utilizate în construcția dispozitivelor electromagnetice de vehiculare a lichidelor electroconductoare.

Tot din meniul principal (fig.6.1) se poate apela aplicația "Mefdem-prg", care cuprinde sub formă de fișiere rezultatele analizei numerice a câmpului magnetic și a câmpului termic la o serie de dispozitive electromagnetice de vehiculare a lichidelor electroconductoare.

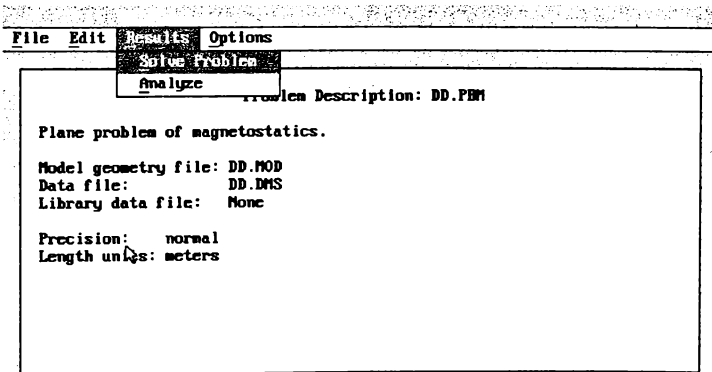
Sistemul de programe de proiectare optimală și analiză numerică a dispozitivelor electromagnetice din componența pompelor magnetohidrodinamice de repulsie, denumit SPPADEM, deși cuprinde un număr foarte mare de programe, și nu tocmai simple, poate fi folosit de orice electrotehnician, chiar dacă acesta nu este specialist în calculatoare.

Programele sistemului de programe SPPADEM sunt decuplate între ele, adică fiecare program poate fi rulat independent și în orice ordine sau succesiune la dorința utilizatorului. De asemenea, pentru o prezentare cât mai intuitivă a rezultatelor au fost folosite la maximum facilitățile grafice ale calculatorului.



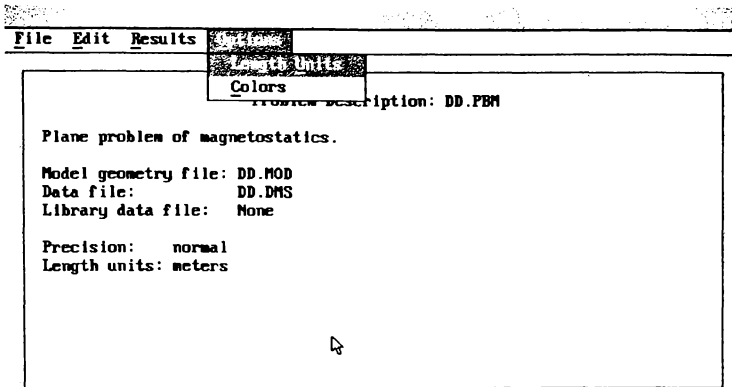
Defines problem

Fig.6.5. Caseta meniului Edit al aplicatiei MEF-DEM-exe.



Solves the problem to get the results

Fig.6.6 Caseta meniului Results al aplicatiei MEF-DEM-exe



Selects length units

Fig.6.7. Caseta meniului Options al aplicatiei MEF-DEM-exe

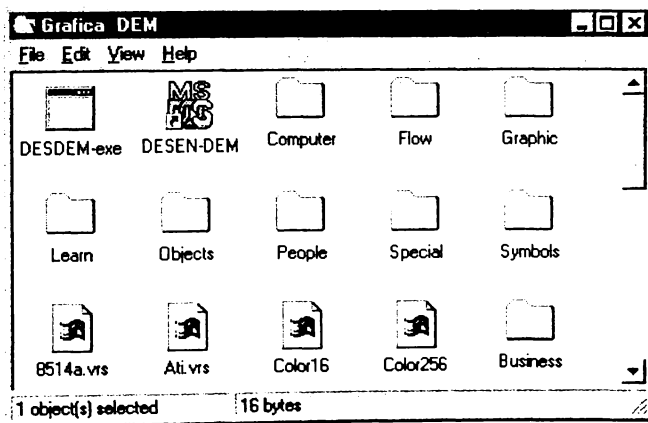


Fig.6.8. Fereastra aplicatiei Grafica - DEM.

CAPITOLUL 7

ÎNCERCĂRI EXPERIMENTALE

7.1. VALIDAREA PROIECTĂRII OPTIMALE ASISTATĂ DE CALCULATOR A DISPOZITIVELOR ELECTROMAGNETICE DE VEHICULARE A LICHIDELOR ELECTROCONDUCTOARE

Pentru validarea proiectării optimale asistată de calculator a dispozitivelor electromagnetice din componența pompelor magnetohidrodinamice de repulsie s-a procedat astfel:

1) S-au admis ca date inițiale de proiectare datele corespunzătoare unui model experimental de dispozitiv electromagnetic pentru o pompă magnetohidrodinamică de repulsie destinată vehiculării plumbului topit, model experimental existent la S.C. Industria Sârmei S.A. din Câmpia Turzii.

2) S-a efectuat, cu aceste date inițiale (în subcapitolele 3.5. și 4.4), reproiectarea automată și optimizarea proiectării dispozitivului electromagnetic de vehiculare a plumbului topit cu ajutorul programelor PRODEM-D și respectiv OPTDEM.

3) S-au comparat rezultatele obținute prin rularea succesivă a programelor PRODEM-D și OPTDEM cu datele dispozitivului electromagnetic existent (vezi tabelul 7.1).

Analizând tabelul 7.1. se constată că proiectarea optimală asistată de calculator a dispozitivului electromagnetic de vehiculare a plumbului topit se apropie de o proiectare și realizare clasică a acestuia, conducând însă la unele reduceri importante de consum de materiale active (cuprul bobinei inductoare și fierul circuitului magnetic) și putere (energie) absorbită de la rețea, precum și la o îmbunătățire a randamentului și calității.

Tabelul 7.1.

Datele dispozitivului electromagnetic existent	Mărimile (dispozitivului electromagnetic) calculate cu programele PRODEM-D și OPTDEM
$D_{Fe} = 80 \text{ mm}$	$D_{Fe} = 83,4 \text{ mm}$
$h_{Fe} = 46 \text{ mm}$	$h_{Fe} = 44 \text{ mm}$
$l_{Fe} = 71 \text{ mm}$	$l_{Fe} = 69,7 \text{ mm}$
$c_{Fe} = 17 \text{ mm}$	$c_{Fe} = 17,2 \text{ mm}$
$d_{Fe} = 77 \text{ mm}$	$d_{Fe} = 79,5 \text{ mm}$
$H_B = 35 \text{ mm}$	$H_B = 33 \text{ mm}$
$g_B = 63 \text{ mm}$	$g_B = 61,7 \text{ mm}$
$S = 3228 \text{ VA}$	$S = 3166 \text{ VA}$
$\eta = 0,71$	$\eta = 0,80$
$M_{Cu} = 6,1 \text{ kg}$	$M_{Cu} = 5,532 \text{ kg}$
$M_{Fe} = 9,288 \text{ kg}$	$M_{Fe} = 9,009 \text{ kg}$
$M = 16,85 \text{ kg}$	$M = 16,085 \text{ kg}$

**7.2. VERIFICAREA EXPERIMENTALĂ A ANALIZEI NUMERICE DE
CÂMP MAGNETIC ȘI CÂMP TERMIC LA DISPOZITIVELE
ELECTROMAGNETICE DE VEHICULARE A LICHIDELOR
ELECTROCONDUCTOARE**

În vederea verificării experimentale a analizei numerice a câmpului magnetic și a câmpului termic la dispozitivele electromagnetice de vehiculare a lichidelor electroconductoare s-au parcurs succesiv următoarele etape:

1) Datele modelului experimental, de dispozitiv electromagnetic pentru o pompă magnetohidrodinamică de repulsie destinată vehiculării plumbului topit, model experimental existent la S.C. Industria Sârmei S.A. din Câmpia Turzii, s-au introdus ca date inițiale în programele de analiză numerică a câmpului magnetic și respectiv a câmpului termic și s-au rulat apoi aceste programe (vezi subcapitolul 5.4.).

2) S-au efectuat măsurători de câmp magnetic cu ajutorul unei sonde Hall.

Dimensiunile geometrice ale sondei utilizate sunt prezentate în fig.7.1., observându-se aria de 1 mm^2 a suprafeței active a sondei.

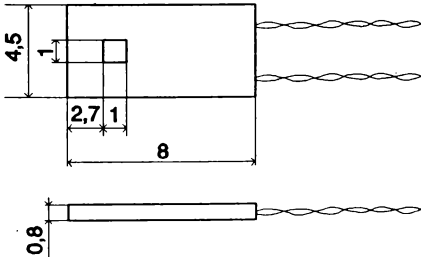


Fig.7.1. Dimensiunile sondei Hall utilizate.

Sonda Hall a fost fixată pe un suport electroizolant, suplu și rezistent, astfel încât să poată fi poziționată în punctele de măsură situate la diferite adâncimi în zona centrală a întrefierului dispozitivului electromagnetic de vehiculare a plumbului topit.

Având în vedere faptul că permeabilitatea magnetică a plumbului topit este aproximativ $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$, măsurătorile de câmp magnetic s-au efectuat în absența plumbului topit, întrefierul fiind ocupat cu aer.

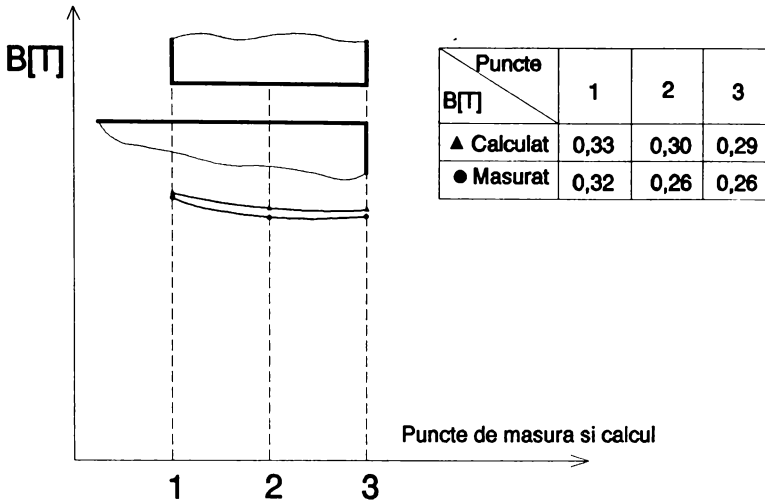


Fig.7.2. Variația inducției magnetice din întrefier cu înălțimea polului circuitului magnetic; a - curba inducțiilor magnetice calculate; b - curba inducțiilor magnetice măsurate.

3) S-au comparat valorile inducțiilor magnetice obținute prin calcul cu valorile inducțiilor magnetice măsurate (vezi fig.7.2.)

Din aceste măsurători de câmp magnetic se observă că valorile inducțiilor magnetice calculate cu ajutorul programului de analiză numerică a câmpului magnetic sunt foarte apropiate de cele măsurate în punctele unde s-au putut face măsurători.

4) S-a pus dispozitivul electromagnetice de vehiculare a plumbului topit în funcțiune la parametrii nominali și s-a lăsat în funcțiune până la stabilirea regimului termic staționar.

S-au efectuat măsurători de temperatură cu ajutorul a 3 termocupluri sudate pe miezul feromagnetic al dispozitivului în punctele indicate în fig.7.3.a.

De asemenea, s-a determinat temperatura medie staționară a conductorului bobinei dispozitivului electromagnetice de vehiculare a plumbului prin metoda variației de rezistență [32, 80].

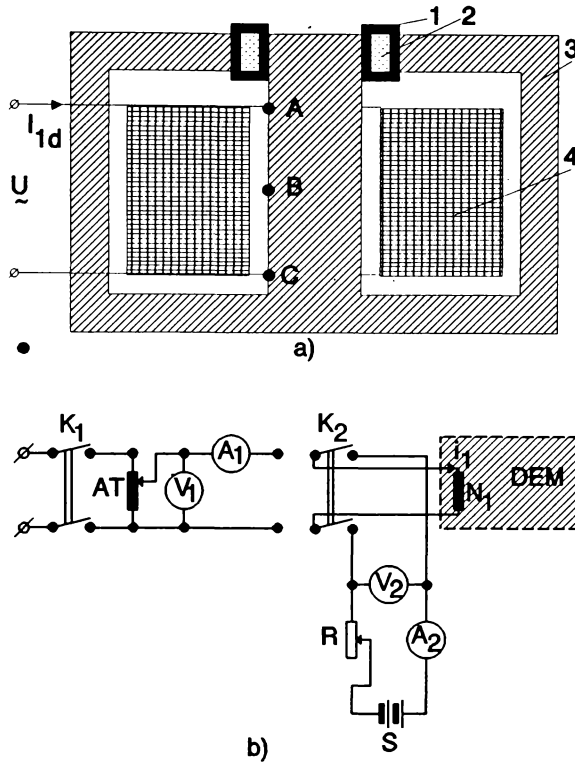


Fig.7.3. a) Locurile de montare a termocupurilor pentru efectuarea măsurătorilor de temperatură; 1-cuvă inelară, 2-plumb topit, 3-miez feromagnetic, 4-bobină, A,B,C, puncte în care se măsoară temperatura; b) Montaj pentru determinarea temperaturii medii staționare a conductorului bobinei dispozitivului electromagnetic de vehiculare a plumbului topit.

Rezistența înfășurării s-a măsurat prin metoda volt-ampermetrică cu ajutorul montajului din fig.7.3.b. care conține, în afară de dispozitivul electromagnetic DEM, autotransformatorul AT, contactoarele K_1 și K_2 comandate în contratimp (la închiderea lui K_2 se deschide K_1), ampermetrele A_1 și A_2 , voltmetrele V_1 și V_2 , rezistența reglabilă R și sursa chimică de curent continuu S .

Temperatura medie a conductorului bobinei în regim termic staționar $\theta_{med.Cu}$ s-a calculat cu relația [80]:

$$\theta_{med.Cu} = \frac{R_s}{R_a} \cdot 234,5 + \theta_a - 234,5 \quad (7.1)$$

în care: θ_a reprezintă temperatura mediului ambiant;

R_a - rezistența bobinei la temperatura mediului ambiant;

R_s - rezistența bobinei la temperatura de regim termic staționar.

5) S-au comparat (vezi tabelul 7.2.) temperaturile măsurate cu temperaturile rezultate din analiza numerică cu MEF a câmpului termic și s-au tras concluziile de rigoare. Astfel, în punctele A, B, și C între valorile măsurate și cele calculate ale temperaturii există o eroare relativă procentuală:

$$\epsilon = \frac{|\theta_{masurat} - \theta_{calculat}|}{|\theta_{calculat}|} \cdot 100 \leq 4,9\%$$

De asemenea, din ANEXA 9 și tabelul 7.2. rezultă că temperatura medie măsurată a conductorului bobinei este cuprinsă între temperaturile maximă și minimă rezultate din analiza numerică cu MEF a câmpului termic al bobinei.

Tabelul 7.2.

Temperatura corespunzătoare regimului staționar	Valori măsurate	Valori calculate prin analiza numerică cu MEF a câmpului termic	Eroarea relativă procentuală
Temperatura în punctul A	85°C	81°C	4,9%
Temperatura în punctul B	86°C	83°C	3,6%
Temperatura în punctul C	92°C	88°C	4,5%
Temperatura medie a conductorului bobinei	82,5°C		

CAPITOLUL 8

CONCLUZII

CONCLUZII GENERALE

Prezenta teză se vrea a fi un argument în justificarea calității și eficienței folosirii calculatorului personal în activitatea curentă a inginerului electrotehnician de cercetare, proiectare și analiză a dispozitivelor electromagnetice de vehiculare a lichidelor electroconductoare.

Față de maniera tradițională (clasică) de proiectare și realizare a dispozitivelor electromagnetice destinate antrenării lichidelor electroconductoare, proiectarea optimală asistată de calculator a acestor dispozitive cu ajutorul programelor PRODEM și OPTDEM conduce la:

- reducerea consumului de energie și materiale active (fier, cupru),
- îmbunătățirea calității și a caracteristicilor funcționale,
- reducerea timpilor de proiectare și
- micșorarea costului total al proiectării.

În ceea ce privește analiza numerică a câmpului magnetic și a câmpului termic al dispozitivelor electromagnetice de vehiculare a lichidelor electroconductoare, cu ajutorul pachetului de programe MEF-DEM-1, aceasta:

- permite proiectantului să calculeze solicitările termice și magnetice maxime mult mai precis decât prin metodele obișnuite, deoarece se pot lua în considerare toate neomogenitățile și formele geometrice oricât de complexe ale subsansamblurilor dispozitivului, precum și anizotropia proprietăților fizice și neliniaritățile, și
- oferă proiectantului posibilitatea de a testa preliminar noile idei (privind îmbunătățirea dispozitivului) eliminând costurile experimentării efectuate pe prototipuri.

Cele mai importante rezultate și contribuții originale aduse de autor în legătură cu problemele teoretice și aplicative abordate în prezenta teză sunt:

♦ Pentru fiecare tip constructiv de dispozitiv electromagnetic studiat, a fost stabilită relația analitică de calcul a inducției magnetice a câmpului magnetic inductor în lichidul electroconductor din zona de pompare.

♦ S-a dedus o relație generală de calcul pentru densitatea de volum a forței electromagnetice ce acționează asupra lichidului electroconductor din întrefierul DEM.

♦ Pornind de la relațiile deduse pentru calculul inducției magnetice a câmpului magnetic inductor și densității de volum a forței electromagnetice ce se exercită asupra indusului lichid, s-a determinat și relația generală de calcul a vitezei lichidului electroconductor în zona de pompare inelară a DEM.

♦ S-a conceput un algoritm și un program de proiectare a DEM, care se remarcă prin simplitate și eficiență și care asigură o proiectare de înaltă calitate prin luarea în considerare a neliniarității circuitului magnetic.

Proiectarea asistată de calculator a DEM permite complicarea algoritmului de calcul oricât de mult și renunțarea la unele ipoteze simplificatoare de la calculul de proiectare clasic.

♦ S-a elaborat un program de optimizare a proiectării DEM foarte rapid și foarte ușor de mânuit de către proiectant datorită vizualizării pe ecranul monitorului a "**curbei de optimizare**" - a dependenței funcției obiectiv (criteriu) de variabila de proiectare aleasă. "**Curba de optimizare**" îi oferă proiectantului informații nu despre o valoare optimă a variabilei de proiectare, ci despre intervalul de optimalitate al acesteia, dacă valoarea sa optimă nu este o valoare critică. Intersectând intervalele de optimalitate determinate în raport cu mai multe criterii de optimizare, se va obține optimul global al variabilei de proiectare considerate.

♦ S-a elaborat un program denumit DEMMAG de analiză numerică cu MEF a câmpului magnetic inductor în bobina, miezul feromagnetic și întrefierul unui dispozitiv electromagnetic de vehiculare a lichidelor electroconductoare. Programul de analiză numerică a câmpului magnetic permite vizualizarea spectrului

liniilor de câmp magnetic, cu un număr ales de proiectant de linii de câmp, dând informații utile despre zonele cu solicitări magnetice maxime.

Rezultatele analizei numerice de câmp magnetic se pot memora într-o bibliotecă de fișiere.

♦ S-a întocmit un program, denumit DEMTER de analiză numerică cu MEF a câmpului termic în bobina și miezul feromagnetic al unui dispozitiv electromagnetic de vehiculare a lichidelor electroconductoare.

Și acest program are posibilitatea de prezentare grafică a rezultatelor sub forma unui spectru de linii de câmp termic, (din care să rezulte zonele cu solicitări termice maxime) și posibilitatea de salvare a rezultatelor obținute într-o bibliotecă de fișiere.

♦ S-a întocmit un sistem de programe pentru proiectarea optimală și analiza numerică a dispozitivelor electromagnetice din componența pompelor magnetohidrodinamice de repulsie, denumit SPPADEM, care reunește toate programele de proiectare, optimizare și analiză a DEM.

♦ S-a stabilit o metodă de validare a programelor de proiectare optimală și analiză a DEM prin determinări experimentale pe un dispozitiv electromagnetic existent și proiectat clasic fără ajutorul calculatorului.

În încheiere, se poate menționa că prin punerea la dispoziția proiectantului a sistemului de programe SPPADEM, ușor de mânuit și suficient de rapid, i se va permite acestuia să se concentreze asupra analizei problemei tehnic propriu-zise, asupra analizei variantei optime. Sistemul SPPADEM, dacă ar mai avea și o bază cunoștințe alături de baza de date și setul de programe prezentate, ar putea deveni un sistem expert pentru proiectarea optimală și analiza DEM.

BIBLIOGRAFIE

-
-
- [1] ALTGAUZEN, A.P., ș.a. "Instalații electrotermice industriale - traducere din limba rusa", Editura Tehnica, București, 1975.
- [2] ANDEA P., "Dispozitive electromagnetice pentru acționarea liniară pas cu pas", Teză de doctorat, .I.P.T.V. Timișoara, 1983.
- [3] ANDEA, P. "Electromagneții", Editura Helycon, Timișoara, 1993.
- [4] ANDEA, P. "Tehnologia fabricării aparatelor electrice", Litografia U.T. Timișoara, 1992.
- [5] ANDEA, P., "Calculul fluxului magnetic, inductivității și forței de atracție la electromagneții în manta saturați", Lucrările Conferinței Naționale de Electrotehnică și Electroenergetică, vol.10, Craiova, 1984.
- [6] ANGOT, A., "Complemente de matematici", Editura Tehnică, București, 1965.
- [7] ASAI, S. "Birth and Recent Activities of Electromagnetic Processing of Materials", Trans. Iron Steel Inst.Jpn. International, vol.29, No.12, pp.981-992, 1989.
- [8] ASCHE, G., "Dynamic Behavior of Electromagnetic Actuators", ETEP vol.1, Nr.3, May/June, 1991, pp.131-135.
- [9] AYOUB, M., ROY, F., ș.a., "Numerical modelling of 3D magnetostatic saturated structures with a hibrid FEM-BEM technique", IEEE Trans.Magn., vol.28, no.2, pp.1052-1055, march, 1992.
- [10] BAMJI, P.J.F. "Some applications of a linear electric machine for handling molten aluminium", London, Congres IEE, oct.1974.
- [11] BEDROSIAN, G., CHARI, M.V.K., JOSEPH, J., "Comparison of Full and Reduced Potential Formulations of Low Frequency applications", 5th Biennial CEFC Conference, Claremont, California, 1992.
- [12] BEDROSIAN, G., "A New Method for Coupling Finite Element Field Solutions with External Circuits and Kinematics", IEEE Transactions on Magnetics, vol.29, No.2, March 1993, pp.1664-1668.
- [13] BELMANS, R., FREEMAN, E., "Possibilities and Limitations of CAD-Finite Element Programmes for Designing Electric Machines", Proc.of ICEM'94, Paris, France, pp.351-355.
-
-

-
-
- [14] BIANCHI, N., BOLOGNANI, S., "Analysis and Design of a PM Synchronous Magnetic Drive", Proc.of ICEM'94, Paris, France, pp.341-346.
- [15] BONNET, J., ș.a. "Procédé de dosage de métaux liquides en particulier à la sortie de récipients de fusion, ou de maintien en température au moyen d'une guottière transporteuse électromagnétique. Brevet Franța, nr.2.047.002.
- [16] BRĂȚIANU, C. "Metode cu elemente finite în dinamica fluidelor", Editura Academiei R.S.România, București, 1983.
- [17] BUCUR, E.M., ș.a. "Matematici speciale. Calculul numeric", Editura Didactică și Pedagogică, București, 1983.
- [18] CĂNESCU, T., HUHULESCU, M., DORDEA, R., "Aparate electrice de joasă tensiune. Îndreptar", Editura Tehnică, București, 1977.
- [19] CELOZI, S., FELIZIANI, M., "Time Domain Finit Element Simulation of Conductive Regions", IEEE Transactions on Magnetics, vol.29, No.2, March 1993, pp.1705-1710.
- [20] CHAN, K., "Computer Aided Study and Design in Power System Engineering Using Personal Computer - Based Application Software", Power Engineering Journal, Mai 1991, pp.119-128.
- [21] CHARI, M.V.K., BEDROSIAN, G., D'ANGELO, J. "Finite Element Applications in Electrical Engineering", I.E.E.E. Transactions on Magnetics, vol.29, No.2, March 1993, pp.1306 - 1314.
- [22] CHARI, M.V.K., "Finite Element Analysis of Nonlinear Magnetic Fields in Electric Machines", Ph.D.Dessertation, Mc Gill University, Montreal, Canada, 1970.
- [23] CHIOREANU, V., "Materiale electrotehnice", Litografia I.P. Timișoara, 1983.
- [24] COCHET, L., s.a. "Application possibles des champs électromagnétiques pour le traitement et le contrôle de la fonte et de l'acier liquids", Révue de métallurgie, 1, 1972.
- [25] COMȘA, D., "Utilizări ale energiei electrice", Editura Didactică și Pedagogică, București, 1973.
- [26] CRSTICI, B., ș.a. "Matematici speciale", Editura Didactică și Pedagogică, București, 1981.
- [27] COUWENBERGH, J.P., "L'Indispensable pour AUTOCAD-Version 10, Marabour, Paris, 1992.
-
-

-
-
- [28] CIVIJDIAN, G.A., "Aparate electrice", Litografia Universității Craiova.
- [29] DANCEA, I., "Metode de optimizare", Editura Dacia, Cluj-Napoca, 1976.
- [30] DARIE, S. "Vibratoare Electrice", Editura Tehnică, București, 1987.
- [31] DE SABATA, I., "Bazele electrotehnicii", vol.I, II și III, Litografia I.P.T.V. Timișoara, 1972-1976.
- [32] DELESEGA, I., "Încercarea aparatelor și echipamentelor electrice", Editura Helicon, Timișoara, 1995.
- [33] DONEA, J., GIULIANI, S., PHILIPPE, A. "Finite Elements in the Solution of Electromagnetic Induction Problems", Int.Jour. for Num. Methods in Engg., Vol.8, pp.359-367, 1974.
- [34] DORDEA, T., "Mașini electrice", Editura Didactică și Pedagogică, București, 1977.
- [35] DORDEA, T., "Proiectarea și construcția mașinilor electrice", vol.I, Litografia I.P.T.V. Timișoara, 1982.
- [36] DRAGOȘ, L. "Magnetodinamica fluidelor", Editura Academiei, București, 1969.
- [37] ENCARNAÇÃO, J., SCHLECHTENDAHL, E.G., "Computer Aided Design. Fundamentals and System Architectures", Springer Verlag, New York, 1983.
- [38] FERNANDEZ, F.A., YONG, Y.K., ETTINGER, R.D., "A Simple Adaptive Mesh Generator for 2-D Finite Element Calculations", IEEE Transactions on Magnetics, vol.29, No.2, March 1993, pp.1882-1885.
- [39] FIREȚEANU, V., "Pomparea și antrenarea electromagnetică a metalelor topite", Ed.Tehnică, București, 1986.
- [40] FIREȚEANU, V., GHEYSSENS, R. "Numerical Modeling of the Electromagnetic Flow Rate Control of Molten Metals", IEEE Transactions on Magnetics, vol.30, No.5, September 1994, pp.3343-3346.
- [41] FIREȚEANU, V., GHEYSSENS, R. "Numerical Modeling of the Traveling Field Diffusion. Induction Heating and Electromagnetic Stirring", IEEE Transactions Magnetics, vol.28, No.2, March 1992, pp.1489-1492.
-
-

-
-
- [42] FIRETEANU, V., PETRE, V., KOVACS, F., BĂLGĂRĂDEAN, M., FAZEKAS, N., SIBIANU, I. "Pompă electromagnetică monofazată de repulsie, pentru agitarea băilor de metale lichide", Brevet, RO, nr.106053 B1/1993.
- [43] FLOREA, J., PANAITESCU, V. "Mecanica fluidelor", Editura Didactică și Pedagogică, București, 1979.
- [44] GARNIER, M., Proceedings of the Sixth International Iron and Steel Congress, Nagoya, Japan, 1990, pp.226.
- [45] GÂRBEA, D., "Analiză cu elemente finite. Aplicații pe microcalculatoare", Editura Tehnică, București, 1990.
- [46] HENNENBERGER, G., SATLER, Ph.K., SHEN, D., HADRY, W., "Coupling of Magnetics and Fluid Flow Problem and its Applications", IEEE Transactions on Magnetics, vol.29, No.2, March 1993, pp.1589-1594.
- [47] HORTOPAN, Gh. "Aparate electrice", Editura Didactică și Pedagogică, București, 1978.
- [48] HORTOPAN, Gh. ș.a. "Probleme de aparate electrice", Editura Didactică și Pedagogică, București, 1982.
- [49] HORTOPAN, Gh. "Aparate electrice de comutație", Editura Tehnică, București, 1985.
- [50] HORTOPAN, Gh. "Aparate electrice de comutație", vol.I, Editura Tehnică, București, 1993.
- [51] HNATIUC, E. "Studiul regimului de vibrații al electromagneților de curent continuu și alternativ. Regimul dinamic al electromagneților", Teză de doctorat, I.P.Iași, 1983.
- [52] HRISTEA, F., "Sistemul de programe Norton Commander", Ed. Tehnică, București, 1992.
- [53] HUGUES, W.F., YOUNG, F.J. "The Electromagnetodynamics of Fluids", John Wiley & Sons, Inc. New York-London-Sydney, 1966.
- [54] HUHULESCU, M. "Bobinarea aparatelor electrice", București, Editura Tehnică, 1978.
- [55] ICHIM, I., MARINESCU, G. "Metode de aproximare numerică", Editura Academiei,, București, 1986.
- [56] IFRIM, A., NOȚINGHER, P., "Materiale electrotehnice", Editura Didactică și Pedagogică, București, 1979.
-
-

-
-
- [57] IONESCU , B.C., "Studiul teoretic și experimental al traductoarelor electromagnetice de debit" - rezumat teză de doctorat, Litografia I.P.București, 1992.
- [58] IONESCU, B.,C., "Laminar Flow of an Electrically Conducting Incompressible Fluid in a Rectangular Pipe under Transverse Magnetic Field", Proceedings of the Conference on Optimization of Electric, Electronic Driving, Automation and Computing Equipments, Braşov, nov., 1987.
- [59] JAMSA, K., "Concise Guide to Microsoft Windows 3.1", Ed.Microsoft Press, 1992.
- [60] JUFER, M., RĂDULESCU, M.M., "Modelisation Unidimensionnel des Phenomenes Couples Magneto-Termiques dans les Pieces en Acier Chauffes par Induction", Ecole Polytechnique Federal de Lausanne, Lausanne, 1990, Swiss.
- [61] KAMIYAMA, S., KAWAI, I. "Laminar flow of conducting liquid between two coaxial cylindres in a traveling magnetic field", Magnitnaia ghidrodinamika, 3, 1977.
- [62] LANDAU, L.D. ș.a., "Electrodinamica mediilor continue", Editura Tehnică, București, 1968.
- [63] LEONTE, P. "Aparate electrice", vol.1 și 2, Litografia I.P. Iași, 1983.
- [64] LEONTE, P., HURUBARU, M., "Tehnologia fabricării aparatelor electrice", Litografia I.P. Iași, 1989.
- [65] LEY, B.J., "Computer Aided Analysis and Design for Electrical Engineers". Holt, Reinhart and Winston, Inc., New York, 1970.
- [66] LOMBARD, P., MEUNIER, G., "A General Purpose Method for Electric and Magnetic Combined Problem for 2-D Axis Symetric and Transient System", IEEE Transaction on Magnetics, vol:29, No.2, March 1993, pp.1737-1740.
- [67] LOWTHER, D.A., SILVESTER, P.P., FREEMAN, E., REA, K., TROWBRIDGE, C., NEWMANN, M., SIMKIN, J. "Ruthless - A General Purpose Finite Element Post-Processor", I.E.E.E. Transaction on Magnetics vol.Mag.17, No.6, nov.1981.
- [68] MARCHOUK, G., AGOCHKOV, V. "Introduction aux methodes des elements finit", Editura Mir, 1985.
- [69] MARINESCU, Gh., ș.a. "Probleme de analiză numerică", Editura Didactică și Pedagogică, București, 1978.
-
-

-
-
- [70] MARINESCU, Gh., "Analiza numerică", Editura Academiei, București, 1974.
- [71] MASSE, P., FANTRELLE, Y., GAYNOUD, A., "Coupled Methods for 3D Coupled Problems. 10 Years of experiments in MHD", Compumag 8th on the Computation of Electromagnetic Fields July 7-11, Sorrento, Italy, 1991.
- [72] MATHE, B., CÂRSTEA, D., FELDMAN, E., RARINCA, O. "Încercarea aparatelor electrice", Editura Tehnică, București, 1976.
- [73] MÂNDRU, G., RĂDULESCU, M. "Analiza numerică a câmpului electromagnetic", Editura Dacia, Cluj Napoca, 1986.
- [74] MARTY, P., ALEMANY, A. "Metallurgical Application of Magnetohydrodynamics", Proceedings of a Symposium of the IUTAM, Met.Soc., ed., Freund Pub.House Ltd., London, 1984.
- [75] MELVIN, C., ș.a., "Proces and system for pumping molten metal", Brevet SUA, nr.3.759.653, 1972.
- [76] MOCANU, C.I. "Teoria câmpului electromagnetic", Editura Didactică și Pedagogică, București, 1981.
- [77] MOCANU, C.I., "Electrodinamica hertziană a corpurilor în mișcare", Editura Academiei, 1985.
- [78] MOCANU, C.I., "Electrotehnică și instalații electrice în metalurgie", Editura Didactică și Pedagogică, București, 1983.
- [79] MOLDOVAN, L., "Proiectarea aparatelor și echipamentelor electrice", Litografia U.T. Timișoara, 1994.
- [80] MOLDOVAN, L., "Echipamente electrice", Litografia U.T. Timișoara, 1994.
- [81] MOLDOVAN L., VĂȚĂU D., "Aplicații și Probleme de Aparate și Echipamente Electrice", Litografia U.P. Timișoara, 1996.
- [82] NICOLAIDE, A., "Bazele fizice ale electrotehnicii", vol.I, Editura Scrisul Românesc, Craiova, 1983.
- [83] NICOLAIDE, A. "Producerea energiei pe cale magnetohidrodinamică", București, 1969.
- [84] OHREMENKO, N.M., "Osnovî teorii i proiectirovania lineinîh inductionîh nasosov dlia jidkih metalov", Moskva, Atomizdat, 1968.
- [85] OLARIU, V., BRĂȚIANU, C. "Modelare numerică cu elemente finite", Editura Tehnică, București, 1986.
-
-

-
-
- [86] PANAITI, V., "Proiectarea și construcția aparatelor electrice", Litografia I.P.București, 1988.
- [87] PASCARIU, I. "Elemente finite. Concepte-aplicații", Editura Militară, București, 1985.
- [88] PAVLOV, K. F., ROMANKOV, P.G., NOSKOV, A.A. "Procese și aparate în ingineria chimică. Exerciții și probleme - trad. din limba rusă", Editura Tehnică, București, 1981.
- [89] PEICOV, A., TUȘALIU, P. "Aparate electrice - proiectare și construcție", Editura Scrisul Românesc, Craiova, 1988.
- [90] PINGCHOU, X., HANG, J., "Application of Generalized Variational Principles in Finite Elements Calculations of Electrical Machine Magnetic Field Problems," BICEM PAPER, Beijing, 1987, pp.134-139.
- [91] PREDĂ, M., CRISTEA, P., MANEA, F. ș.a. "Probleme de electrotehnică și mașini electrice", Editura Didactică și Pedagogică, București, 1982.
- [92] POPESCU, I.M., "Fizică I", Editura Didactică și Pedagogică, București, 1982.
- [93] POLISCHUK, V.P. "Magnetodynamic pumps for melting, treating and pouring of metals in foundries", Proceedings of The Sixth International Iron and Steel Congress, Nagoya, ISIJ, 1990, pp.327-333.
- [94] POLAK, E. "Computational Methods in Optimization", New York, Academic Press, 1971.
- [95] PURCELL, M., EDWARD "Electricitate și magnetism. Cursul de fizică, Berkeley", vol.II, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1982.
- [96] RAKKER, D., RICE, H., "Autocad for Windows", New Riders Publishing, Carmel, Indiana, USA, 1992.
- [97] RAO, S.S. "The Finite Element Method in Engineering", Pergamon Press, Oxford, New York, 1982.
- [98] RĂDULESCU, D., GHEORGHIU, O. "Optimizarea flexibilă și decizia asistată de calculator", Editura Științifică, București, 1992.
- [99] RĂDULEȚ, R. "Bazele electrotehnicii. Probleme", vol.I și II, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1981.
- [100] RODNEY, T., "Electromagnetic flow control", Proc.of XIith UIE Congress Electrotech'92, Montreal.
-
-

-
-
- [101] ROMAN, D., LUSTIG, A., STĂNESCU, C. "Algoritmi de automatizare a proiectării", Editura Militară, București, 1988.
- [102] RUDNER, V., NICOLESCU, C. "Probleme de matematici speciale", Editura Didactică și Pedagogică, București, 1982.
- [103] ȘABAC, I.G., "Matematici speciale", vol.2, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1965.
- [104] SCHEIBER E., LIXĂNDROIU, D. "MathCAD - prezentare și probleme rezolvate", Editura Tehnică, București, 1994.
- [105] SHERCLIFF, J.A. "A Text Book of Magnetohydrodynamics", Pergamon Press Oxford-London-Edinburgh-New York-Paris-Frankfurt, 1965.
- [106] SILVESTER, P.P., FERRARI, R.L. "Finite elements for electrical Engineers", Cambridge University Press, 1983.
- [107] SIMA, V., VARGA, A. "Practica optimizării asistate de calculator", Editura Tehnică, București, 1986.
- [108] SIMION, E., VADAN, I., BĂLAN, H., TIRNOVAN, R., "Analysis by the Finite Element Method of the Magnetic Field in an Electrodynamic Vibrator", Proceedings of International Conference on Applied and Theoretical Electrotechnics, ICATE'93, Craiova, pp.155-160.
- [109] SIEMENS, "Memoratorul inginerului electrician" (trad. din l.germană)", Editura Tehnică, București, 1971.
- [110] ȘORA C., "Bazele electrotehnicii", Editura Didactică și Pedagogică, București, 1982.
- [111] STĂNILĂ, L., FIRIȚEANU, V. "Magnetohydrodynamic interaction in flat induction MHD-machines under the conditions of a two-dimensional transverse edge effect", Revue Roumaine des Sciences Techniques, Electrotechnique et Energetique, tome 28, 3, pp.257-265. București, 1983.
- [112] STRANG, G., FIX, J., "An Analysis of the finite element method", Prentice Hall, New Jersey, 1973.
- [113] SUNDBERG, Y., "Principles of the induction stirrer", ASEA Journal, No.4, 1971.
- [114] SUCIU, I. "Aparate electrice", Editura Didactică și Pedagogică, București, 1968.
- [115] SUCIU, I. "Bazele echipamentelor electrice", Editura Facla, Timișoara, 1980.
-
-

-
-
- [116] SUCIU, I., "Bazele calculului solicitărilor termice ale aparatelor electrice", Editura Tehnică, București, 1980.
- [117] SUCIU, I., "Electromagneți", Editura Tehnică, București, 1994.
- [118] SUCIU, I., DELESEGA, I. "Proiectarea aparatelor și echipamentelor electrice - Îndrumător de proiectare", Litografia I.P. Timișoara, 1991.
- [119] TACHEUCHI, E., "Applied mhd in the process of continuous casting", Magnetohydrodynamics in Process Metallurgy, The Mineral, Metals & Materials Society, USA, 1991.
- [120] TIMOTIN, A., ș.a., "Leccióni de bazele electrotehnicii", Editura Didactică și Pedagogică, București, 1970.
- [121] TOBOC, P., FIRETEANU, V., VÂRCOLACU, I., MIREA, V., NICOLAE, M., MIHĂILESCU, C., GIURGEA, V., "The influence de electromagnetic stirring on the solidification structure of steels", European Continuous Casting Conference, Florence, Italy, sept.1991.
- [122] VADAN, I., "Proiectarea și analiza asistată de calculator a vibratoarelor electrodinamice", - rezumat teză de doctorat, Litografia I.P.Cluj Napoca, 1995
- [123] VANTI, M.G., ș.a., "A Magnetostatic 2D comparison of local error estimators in FEM", IEEE Trans.Magn., vol.29, no.2, march 1993 ,pp.1902-1905.
- [124] VASILIEVICI, Al., "Aparate electrice", vol.I, Litografia I.P.T.V. Timișoara, 1972.
- [125] VASILIEVICI, Al., MOLDOVAN, L., "Aparate electrice", vol.II, Litografia I.P.T.V. Timișoara, 1972.
- [126] VASILIEVICI, Al., "Aparate electrice", Litografia I.P.T.V. Timișoara, vol.I, 1986, vol.II, 1987.
- [127] VASILIEVICI, Al., "Aparate și echipamente electrice", Editura MS, Sibiu, vol.I, 1995, vol.II, 1996.
- [128] VASILIEVICI, Al., MOLDOVAN, L. "Elemente de tehnologie a aparatelor de joasă tensiune", Editura Facla, Timișoara, 1981.
- [129] VĂTĂU, D., "Asupra realizării unui sistem de măsură și prelucrare a datelor pentru studiul câmpului termic al bobinelor electromagneților de curent continuu și curent alternativ", Analele Universității din Oradea, pp.123-130, 1993.
-
-

-
-
- [130] VĂTĂU, D., VASILIEVICI, Al., "Determinarea curbei de variație a inductivității funcție de întrefier la un electromagnet dublu E", *Analele Universității din Oradea*, vol.2, pp.220-227, 1992
- [131] VĂTĂU, D., VASILIEVICI, Al., "Über die Projektierung der Gleichstromelektromagneten die von Computer assistiert ist", *Volumul Sesiunii de Comunicări Științifice "Tehnici noi în conducerea rețelelor de distribuție"*, pp.335-340, I.P.Iași, oct.1992.
- [132] VĂTĂU, D., VASILIEVICI, Al., "Projektierung der elektromagnetischen Getriebe der elektrischen Messgeräte", *Volumul Sesiunii de Comunicări Științifice "Tehnici noi în conducerea rețelelor de distribuție"*, pp.341-346, I.P.Iași, oct.1992.
- [133] VĂTĂU, D., "Orientări actuale și de viitor în proiectarea și construcția mecanismelor electromagnetice din componența aparatelor electrice", *Referat de doctorat nr.1*, U.T. Timișoara, aprilie 1991.
- [134] VĂTĂU, D., "Metodica generală a calculului mecanismelor electromagnetice", *Referat de doctorat nr.2*, U.T. Timișoara, februarie 1992.
- [135] VĂTĂU, D., "Considerații privind calculul și proiectarea asistată de calculator a mecanismelor electromagnetice din componența aparatelor electrice", *Referat de doctorat, nr.3*, U.T. Timișoara, 1992
- [136] VĂTĂU, D., "About Magnetic Field and Electrodynamical Force Calculation at Full Current Paths of Switchgears", *First National Symposium on "High Current and High Voltage Tests, Measurements and Qualification of Electrical Equipment"*, ICMET Craiova, sept.1995.
- [137] VĂTĂU, D., "About Finite Element Analysis of the Flat Electromagnetic Field in Switchgears", *First National Symposium on "High Current and High Voltage Tests, Measurements and Qualification of Electrical Equipment"*, ICMET Craiova, sept.1995.
- [138] VON ŠTARCK "Inducteur a champ d'ondes progressives notamment utilisé pour le brassage d'une masse de metal en fusion. Brevet Franța, nr.2.071.614.
- [139] ZIENKIEWICH, D.C., "The Finite Element Method in Engineering Science", Mc.Graw-Hill, London, 1971.
- [140] ZIDĂROIU, C., "Programare liniară", Editura Tehnică, București, 1983.
-
-

-
-
- [141] * * * "Electromagnetic pumps", Prospect GEC Reactors Equipment Ltd., 1990.
- [142] * * * "Electromagnetic pumps for liquid metals", Prospect Groupement Atomique Alsaciene Atlantique, 1986.
- [143] * * * "Pompes à induction pour metal liquide", Prospect CFEI, Filiale Dynathermic, Groupe Dynelec, 1995.
- [144] * * * "Induction Heating", Prospect CFEI Saphymo-Stel, subsidiary of Dynathermic, 1993.
- [145] * * * "La mécanique des fluides et la magnétohydrodynamique", Cie française d'électrothermie industrielle (CFEI), Grenoble, 1990.
- [146] * * * "International Electrotechnical Vocabulary", IEC Publ.50.
- [147] * * * "Conduction and induction pumps for liquid metals", Prospect General Electric Company, 1980.
- [148] * * * "Engineering Aspects of Magnetohydrodynamics", Columbia Univ.Press, New York - London, 1992
- [149] * * * Prospect ASEA, Suedia.
- [150] * * * "Technische Tabellen. Grösse, Formeln, Begriffe", Siemens, 1988.
- [151] * * * Colecția de standarde referitoare la materialele și condițiile tehnice specifice aparatelor și echipamentelor electrice.
- [152] * * * "MathCAD - Version 2.5.", User's Guide. MathSoft Inc., Cambridge, MA, USA.
- [153] * * * "Microsoft Windows 95", User's Guide, 1992.
-
-

ANEXE

PRINCIPALELE NOTAȚII FOLOSITE ÎN LUCRARE

DEM	Dispozitive electromagnetice
SPPADEM	Sistem de programe de proiectare optimală și analiză numerică a dispozitivelor electromagnetice
θ_f	Temperatura de topire a lichidului electroconductor
λ_f	Căldura latentă de topire a lichidului electroconductor
λ	Conductivitatea termică a lichidului electroconductor
σ	Conductivitatea electrică a lichidului electroconductor
c	Căldura specifică masică a lichidului electroconductor
ρ_d	Densitatea lichidului electroconductor
ν	Vâscozitatea cinematică a lichidului electroconductor
\vec{B}	Vectorul inducție magnetică în zona de pompare
\vec{H}	Vectorul intensității câmpului magnetic în zona de pompare
\vec{E}	Vectorul intensității câmpului electric în zona de pompare
\vec{J}	Vectorul densității de curent în zona de pompare
μ	Permeabilitatea magnetică a lichidului electroconductor
\bar{v}	Viteza lichidului electroconductor în raport cu sistemul de referință fix
\vec{g}	Vectorul accelerație gravitațională
η	Coeficientul de vâscozitate dinamică a lichidului electroconductor
p	Presiunea
\vec{F}^*	Forță de altă natură decât electromagnetică ce acționează asupra fluidului electroconductor din unitatea de volum
H_i	Entalpia lichidului electroconductor
h_c	Înălțimea zonei de pompare ocupată de lichidul electroconductor
d_c, l_c	Dimensiuni interioare ale zonei de pompare ocupată de lichidul electroconductor (vezi fig.2.3)

D_c, L_c	Dimensiuni exterioare ale zonei de pompare ocupată de lichidul electroconductor (vezi fig.2.3)
P_u	Presiunea utilă a pompei magnetohidrodinamice de repulsie
V	Debitul volumic de lichid electroconductor
S_t	Aria secțiunii transversale de trecere a curentului de lichid electroconductor
v_{med}	Viteza medie în secțiunea transversală de trecere a curentului de lichid electroconductor
U	Tensiunea de alimentare
f	Frecvența
N_1	Numărul total de spire al înfășurării dispozitivului electromagnetic de vehiculare a lichidelor electroconductoare
i_1	Curentul electric prin bobina dispozitivului electromagnetic de vehiculare a lichidelor electroconductoare
h_{Fe}, l_{Fe}	Înălțimea și lățimea ferestrei circuitului magnetic
J_1	Densitatea de curent în conductorul înfășurării dispozitivului electromagnetic de vehiculare a lichidelor electroconductoare
B_{Fecm}	Inducția magnetică maximă în coloana centrală a miezului feromagnetic
B_m	Inducția magnetică maximă în întrefier
K_{Fe}	Coeficientul de împachetare al miezului feromagnetic
a_1	Grosimea pereților canalului de curgere a lichidului electroconductor în zona de pompare
a_2	Grosimea izolației termice dintre miezul feromagnetic și canalul de curgere a lichidului electroconductor
ff	Factorul de formă al dispozitivului electromagnetic
ρ_1	Rezistivitatea cuprului la temperatura mediului ambiant
δ	Întrefierul dispozitivului electromagnetic de vehiculare a lichidelor electroconductoare

a_c	Grosimea zonei de pompare ocupată de lichidul electroconductor
\vec{F}_v	Vectorul forței electromagnetice ce acționează asupra unității de volum de lichid electroconductor în zona de pompare
V_m	Potențialul magnetic scalar
i_{1m}	Amplitudinea curentului electric ce parcurge bobina inductoare
ω_1	Pulsația curentului i_1
t	Timpul
φ_1	Defazajul dintre tensiunea de alimentare a bobinei inductoare și curentul ce străbate bobina inductoare
$\Delta\theta_2$	Căderea de temperatură pe izolația termică de grosime a_2
D_{Fe}, a_{Fe}	Dimensiuni ale secțiunii transversale a coloanei centrale a miezurilor feromagnetice (vezi fig.3.8.)
c_{Fe}, d_{Fe}	Dimensiuni ale secțiunii transversale a jugurilor miezurilor feromagnetice (vezi fig.3.8.)
S_c	Aria secțiunii transversale a coloanei centrale a miezului feromagnetic
K_g	Coeficientul geometric de umplere a cercului cu diametrul D_{Fe}
n_{tr}	Numărul de trepte ale coloanei miezului feromagnetic
S_j	Aria secțiunii transversale a jugurilor miezului feromagnetic
Q_{Fe}	Aria secțiunii ferestrei miezului feromagnetic
θ_1	Solenația totală
S_{tCu}	Aria secțiunii transversale a conductorului neizolat din cupru
K_u	Coeficientul de umplere al înfășurării
H_{om}	Amplitudinea intensității câmpului magnetic în aer
H_{Fem}	Amplitudinea intensității câmpului magnetic în fier

H_m	Amplitudinea intensității câmpului magnetic în întrefier
l_{tFe}	Lungimea totală a porțiunilor de fier ale circuitului magnetic
l_o	Lungimea porțiunilor de aer ale circuitului magnetic
U_{mFe}	Tensiunea magnetomotoare necesară magnetizării fierului
$U_{m\delta}$	Tensiunea magnetomotoare necesară magnetizării întrefierului
$U_{m\sigma}$	Tensiunea magnetomotoare necesară acoperirii dispersiei
K_m	Coeficientul de majorare a lui $U_{m\delta}$
P_e	Presiunea electromagnetică determinată de forțele electromagnetice în zona de pompare
P_f	Pierderile de presiune în canalul de curgere a lichidului electroconductor
s_c	Lungimea canalului de curgere a lichidului electroconductor
ξ	Coeficientul pierderilor de sarcină liniare
D_H	Diametrul hidraulic al secțiunii transversale a canalului de curgere a lichidului electroconductor
Re	Numărul lui Reynolds
Ha_1	Numărul lui Hartmann modificat
Ha	Numărul lui Hartmann
$\bar{\tau}_{adm}$	Supratemperatura maximă admisibilă a înfășurării
E_1	Tensiunea electromotoare indusă în toată înfășurarea
e_1	Tensiunea electromotoare indusă într-o spirală a înfășurării
Φ_{Fecm}	Amplitudinea fluxului magnetic prin coloana centrală a miezului feromagnetic
H_B	Înălțimea bobinei inductoare
z_{mf}	Distanța dintre bobină și jugul inferior al miezului feromagnetic
t_{mf}	Distanța dintre bobină și jugul superior al miezului feromagnetic

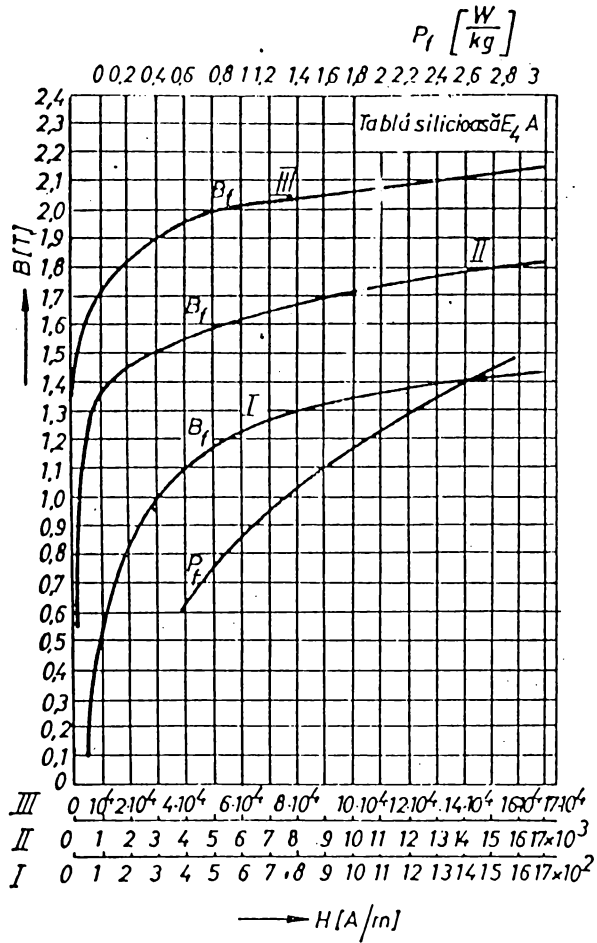
n_{1r}, n_{1p}	Numărul de spire pe un strat al bobinei cu conductor rotund și respectiv profilat
d_{Cu}, d_{CuiZ}	Diametrul conductorului rotund de bobinaj fără și respectiv cu izolație
$a_{Cu}, b_{Cu}, a_{CuiZ}, b_{CuiZ}$	Dimensiunile secțiunii transversale a conductorului dreptunghiular de bobinaj fără și respectiv cu izolație
n_{sr}, n_{sp}	Numărul de straturi ale bobinei pentru conductor rotund și respectiv conductor profilat
g_{Br}, g_{Bp}	Grosimea bobinei pentru conductor rotund și respectiv conductor profilat
l_{ca}	Lățimea canalelor axiale de răcire ale bobinajului
n_{ca}	Numărul canalelor axiale de răcire ale bobinajului
δ_{iz}	Grosimea izolației dintre straturile bobinei
l_{Fer}, l_{Fep}	Lățimea definitivă a ferestrei miezului feromagnetic pentru conductor rotund și respectiv profilat
x_{mf}	Distanța dintre înfășurare și coloana centrală a miezului feromagnetic
y_{mf}	Distanța dintre înfășurare și coloana laterală a miezului feromagnetic
K_{ur}, K_{up}	Valorile definitive ale factorului de umplere a înfășurării pentru conductor rotund și respectiv profilat
$l_{mdr}, l_{mdp}, l_{mtr}, l_{mtp}$	Lungimile medii ale spirei înfășurării în funcție de forma secțiunii transversale a miezului feromagnetic și forma conductorului de bobinaj
$R_{1dr}, R_{1dp}, R_{1tr}, R_{1tp}$	Rezistențele active ale înfășurării în funcție de forma secțiunii transversale a miezului feromagnetic și forma conductorului de bobinaj
ρ_{θ}	Rezistivitatea materialului conductorului bobinei la temperatura convențională de lucru θ
M_{Cu}, M_{Fe}	Masa netă a cuprului din înfășurare și respectiv a fierului miezului magnetic

M_a	Masa pieselor auxiliare ale dispozitivului electromagnetic
M	Masa dispozitivului electromagnetic
φ	Prețul dispozitivului electromagnetic
ρ_{dCu} , ρ_{dFe}	Densitatea cuprului și respectiv a fierului
X_f , X_δ	Reactanța magnetică a fierului și respectiv a întrefierului
R_f , R_δ , R_o	Reluctanța magnetică a fierului, a întrefierului și de dispersie
Z_1 , Z_2 , Z_e	Impedanțe magnetice ale circuitului magnetic
ϕ_{1m} , $\phi_{\sigma m}$	Amplitudinea fluxului magnetic ce străbate întrefierul și respectiv amplitudinea fluxului magnetic de dispersie
I_1	Valoarea efectivă a curentului absorbit de bobina inductoare în regim normal de funcționare
μ_{1m} , μ_{Fecm}	Permeabilități magnetice ale fierului
P_{f1c} , P_{f2c} , P_{f1d} , P_{f2d}	Pierderi specifice în fier
S	Puterea aparentă absorbită de la rețea de către bobina inductoare
P_{Fe}	Pierderile de energie activă în fier prin histerezis și curenți turbionari
P_e	Puterea electromagnetică activă în lichidul electroconductor
P_m	Puterea mecanică dezvoltată în indusul lichid
P_J	Puterea disipată prin efect Joule în indusul lichid
η	Randamentul total al unui dispozitiv electromagnetic de vehiculare a lichidelor electroconductoare
$\bar{\tau}_{max}$	Valoarea medie maximă a suprațemperaturii staționare la care trebuie să funcționeze înfășurarea
M_s , φ_s , S_s	Masa specifică, prețul specific și respectiv puterea aparentă specifică a dispozitivului electromagnetic de vehiculare a lichidelor electroconductoare

PRODEM-A, B, C, D	Subprograme de proiectare a dispozitivelor electromagnetice de vehiculare a lichidelor electroconductoare
PROCAL-A, B, C, D	Proceduri de calcul de proiectare a dispozitivelor electromagnetice
OPTDEM	Program de optimizare a dispozitivelor electromagnetice ale pompelor magnetohidrodinamice de repulsie
F	Funcție obiectiv (sau criteriu) scalară
\bar{x}	Vectorul variabilelor de proiectare
$\bar{x}_{\min}, \bar{x}_{\max}$	Vectori ce conțin limita minimă și respectiv limita maximă a variabilelor de proiectare
V_{opt}	Valoarea optimă a variabilei curente de proiectare
MEF	Metoda elementelor finite
D	Domeniu de analiză
\mathcal{J}_t	Funcționala corespunzătoare elementului finit "t"
V_{mt}^*	Potențialul magnetic vector modificat corespunzător elementului finit "t"
f_{ti}, f_{tj}, f_{tk}	Funcțiile de formă ale elementului finit triunghiular "t"
$r-z-\varphi$	Coordonate cilindrice
$[k_t], [K]$	Matricea caracteristicilor fizico-geometrice ale materialului elementului finit "t" și respectiv materialului structurii
$[p_t], [P]$	Matricea încărcărilor (magnetice sau termice) pe elementul finit "t" și respectiv pe toată structura
$[V_{mt}^*], [\theta_t]$	Matrici ale funcțiilor nodale necunoscute pe elementul finit "t"
$[V_m^*], [\theta]$	Matrici ale funcțiilor nodale necunoscute pe întreaga structură
θ_t	Temperatura corespunzătoare elementului finit toroidal (t)
$\lambda_{rt}, \lambda_{zt}$	Conductivitățile termice după direcția r și respectiv z pe cuprinsul elementului finit (t)

P_{vt}	Puterea dezvoltată în unitatea de volum pe cuprinsul elementului finit (t)
q_t	Densitatea fluxului termic pentru elementul finit (t)
α_t	Transmisivitatea termică corespunzătoare elementului finit (t)
θ_a	Temperatura mediului ambiant
V_t	Volumul elementului finit toroidal (t)
S_{1t}	Suprafața cu schimb de căldură prin conducție, corespunzătoare elementului finit (t)
S_{2t}	Suprafața cu schimb de căldură prin convecție corespunzătoare elementului finit (t)
l_m	Grosimea elementului finit (t)
N_e	Numărul total al elementelor finite din rețeaua de discretizare
N_n	Numărul total de noduri din rețeaua de discretizare
CON	Matrice de conexiuni după elemente a domeniului de analiză
R_a	Rezistența bobinei inductoare la temperatura mediului ambiant
R_s	Rezistența bobinei inductoare la temperatura de regim termic staționar θ_s

<i>Calcul DEM</i> <i>Grafica DEM</i> <i>MEF-DEM-1</i> <i>Mefdem-prg.</i>	} Pictogramele de aplicație ale sistemului de programe SPPADEM
---	--

A. CURBE DE MAGNETIZARE PENTRU TABLĂ SILICIOASĂ E_4A 

Tabelul de magnetizare pentru tole din tablă laminată la rece cu cristale orientate cu grosimea de (0,28...0,35) mm

și $P_{10/50} = 0,45$ W/Kg

B tesla	0	0,01	0,02	0,03	0,04
0,0					
0,1					
0,2					
0,3					
0,4	0,073	0,0737	0,0744	0,0751	0,0758
0,5	0,0802	0,081	0,0818	0,0826	0,0834
0,6	0,0882	0,0891	0,0910	0,0910	0,0920
0,7	0,0983	0,0994	0,1005	0,1016	0,1027
0,8	0,1098	0,1110	0,1122	0,1135	0,1148
0,9	0,1241	0,1260	0,1280	0,1300	0,1329
1,0	0,1440	0,1460	0,1480	0,1500	0,1525
1,1	0,169	0,172	0,176	0,180	0,184
1,2	0,208	0,213	0,218	0,223	0,229
1,3	0,269	0,276	0,284	0,292	0,301
1,4	0,362	0,374	0,387	0,400	0,418
1,5	0,569	0,600	0,635	0,670	0,710
1,6	1,16	1,27	1,38	1,51	1,68
1,7	3,38	3,90	4,40	4,90	5,50
1,8	11,5	13,0	15,0	17,0	19,5
1,9	46,0	55,0	68,0	84,0	100

B tesla	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0					
0,1					
0,2					
0,3					
0,4	0,0765	0,0772	0,0779	0,0786	0,0794
0,5	0,0842	0,0850	0,0858	0,0866	0,0874
0,6	0,0930	0,0940	0,0950	0,0961	0,0972
0,7	0,1038	0,1050	0,1062	0,1074	0,1086
0,8	0,1161	0,1175	0,1190	0,1205	0,1223
0,9	0,1340	0,1360	0,1380	0,1400	0,1420
1,0	0,1550	0,1575	0,1600	0,1630	0,1660
1,1	0,188	0,192	0,196	0,200	0,204
1,2	0,235	0,241	0,248	0,255	0,262
1,3	0,310	0,320	0,330	0,340	0,351
1,4	0,438	0,458	0,480	0,508	0,538
1,5	0,760	0,820	0,890	0,970	1,060
1,6	1,85	2,05	2,30	2,60	2,95
1,7	6,10	6,70	7,40	8,10	9,80
1,8	22,0	26,0	29,0	34,0	39,0
1,9					

Notă: Intensitatea câmpului magnetic H se dă în A/cm.

**B. DETERMINAREA RELAȚIEI DE CALCUL A PUTERII
ELECTROMAGNETICE ACTIVE TRANSMISĂ
LICHIDULUI ELECTROCONDUCTOR**

Puterea electromagnetică activă transmisă lichidului electroconductor P_e se compune din puterea mecanică dezvoltată în lichidul electroconductor P_m și puterea disipată prin efect Joule în lichidul electroconductor P_J .

Puterile P_e , P_m și P_J , sunt mărimi variabile în timp. Pentru proiectarea preliminară a dispozitivelor electromagnetice, ale pompelor magnetohidrodinamice de repulsie, prezintă însă interes valorile medii în timp ale acestor puteri.

Valoarea medie în timp a puterii mecanice dezvoltată în indusul lichid se determină cu relația:

$$P_{mmed} = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{c_{Fe}} dz \int_{r_1}^{R_1} f_{vmed}(r) \cdot v(r) \cdot dr \quad (A2.1)$$

în care: $v(r)$ este viteza de curgere, în regim laminar, a lichidului electroconductor în zona de pompare inelară, având expresia (A4.12),

$$f_{vmed}(r) = -C_4 \cdot C_3 \cdot (r - C_2)^2 \quad (A2.2)$$

este valoarea medie în timp a densității de volum a forței electromagnetice ce se exercită asupra lichidului electroconductor, iar r_1 , R_1 , r , C_2 , C_3 și C_4 au semnificațiile prezentate în paragraful 3.3.

Valoarea medie în timp a puterii disipate prin efect Joule în indusul lichid se obține cu relația:

$$P_{Jmed} = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{c_{Fe}} dz \int_{r_1}^{R_1} (E \cdot J)_{med}(r) \cdot dr \quad (A2.3)$$

Valoarea medie în timp a puterii electromagnetice active transmisă indusului lichid va fi:

$$P_{emed} = P_{mmed} + P_{Jmed} \quad (A2.4)$$

PROPRIETĂȚI FIZICE ALE UNOR METALE [39, 151]

Metalul	Zinc	Sodiu	Potasiu	Litiu
Temperatura de topire, θ_t , [°C]	419,5	97,8	63,7	179
Căldura latentă de topire, λ_t , [kJ/kg]	102	113	61,2	680
Conductivitatea termică, λ , [W/m·grd]	57,9 la 500°C	86 la 100°C	45 la 200°C	38 de la 218°C la 233°C
	57 la 600°C	81,5 la 200°C	40 la 400°C	
Conductivitatea electrică, σ , [1/Ωm]	$16,4 \cdot 10^6$ la 20°C	$21,3 \cdot 10^6$ la 20°C	$15,2 \cdot 10^6$ la 20°C	$4 \cdot 10^6$ la 200°C
	$2,7 \cdot 10^6$ la 500°C	$10,35 \cdot 10^6$ la 100°C	$6,46 \cdot 10^6$ la 100°C	$3,22 \cdot 10^6$ la 400°C
Căldura specifică masică, c , [J/kg·grd]	501 la 419,5°C	1385 la 100°C	820 la 75°C	
	492 la 600°C	1340 la 200°C	790 la 200°C	
Densitatea, ρ_s , [kg/m ³]	6920 la 419,5°C	928 la 100°C	819 la 100°C	507 la 200°C
	6810 la 600°C	891 la 250°C	783 la 250°C	490 la 400°C
Vâscozitatea cinematică, ν , [m ² /s]	$4,594 \cdot 10^{-2}$ la 450°C	$7,7 \cdot 10^{-2}$ la 100°C	$5,61 \cdot 10^{-2}$ la 100°C	$11,1 \cdot 10^{-2}$ la 200°C
	$3,289 \cdot 10^{-2}$ la 600°C	$5,06 \cdot 10^{-2}$ la 200°C	$3,86 \cdot 10^{-2}$ la 250°C	$9,27 \cdot 10^{-2}$ la 300°C

Metalul	Bismut	Cupru	Aluminiu	Dur- aluminiu
Temperatura de topire, θ_r , [°C]	271	1083	660,2	658
Căldura latentă de topire, λ_r , [kJ/kg]	50,2	176+209	401	406
Conductivitatea termică, λ , [W/m·grd]	17,2 la 300°C		103,5 la 700°C	
	15,5 la 400°C		121,5 la 700°C	
Conductivitatea electrică, σ , [1/Ωm]	$0,84 \cdot 10^6$ la 20°C	$59,5 \cdot 10^6$ la 20°C	$34,5 \cdot 10^6$ la 20°C	$3,57 \cdot 10^6$ la 700°C
	$0,776 \cdot 10^6$ la 300°C	$4,69 \cdot 10^6$ la 1083°C	$4,88 \cdot 10^6$ la 670°C	
Căldura specifică masică, c , [J/kg·grd]	142 la 271°C	473 la 1083°C	1083 de la 660°C la 1000°C	1243 la 658°C
	148 la 400°C	553 la 1160°C		1256 la 700°C
Densitatea, ρ_d , [kg/m ³]	10030 la 300°C	8300 la 1200°C	2380 la 660°C	2500 la 700°C
	9910 la 400°C		2369 la 700°C	
Vâscozitatea cinematică, ν , [m ² /s]	$1,71 \cdot 10^{-2}$ la 300°C	$1,58 \cdot 10^{-2}$ la 1165°C	$12,2 \cdot 10^{-2}$ la 500°C	la 500°C
	$1,42 \cdot 10^{-2}$ la 400°C	$3,97 \cdot 10^{-2}$ la 1295°C	$5,97 \cdot 10^{-2}$ la 500°C	

Metalul	Plumb	Magneziu	Mercur	Staniu
Temperatura de topire, θ_r , [°C]	327,4	651	-38,87	231,9
Căldura latentă de topire, λ_r , [kJ/kg]	24,6	344	11,7	60,8
Conductivitatea termică, λ , [W/m·grd]	16,3 la 330°C		8,2 la 0°C	33,5 la 240°C
	15,1 la 600°C		9,65 la 60°C	33,1 la 417°C
Conductivitatea electrică, σ , [1/Ωm]	$4,81 \cdot 10^6$ la 20°C	$22,7 \cdot 10^6$ la 20°C	$1,004 \cdot 10^6$ la 20°C	$8,85 \cdot 10^6$ la 20°C
	$1,02 \cdot 10^6$ la 400°C	$3,61 \cdot 10^6$ la 700°C	$0,967 \cdot 10^6$ la 100°C	$1,95 \cdot 10^6$ la 400°C
Căldura specifică masică, c , [J/kg·grd]	163 la 327°C	1325 la 651°C	139 la 0°C	243 la 250°C
	155 la 400°C	1345 la 727°C	136 la 100°C	317 la 1100°C
Densitatea, ρ_d , [kg/m ³]	10510 la 400°C	1572 la 651°C	13546 la 20°C	6835 la 409°C
	10270 la 500°C	1536 la 700°C	13352 la 100°C	6640 la 704°C
Vâscozitatea cinematică, ν , [m ² /s]	$2,1 \cdot 10^{-2}$ la 400°C		$1,24 \cdot 10^{-2}$ la 0°C	$2,73 \cdot 10^{-2}$ la 240°C
	$1,53 \cdot 10^{-2}$ la 600°C		$1,14 \cdot 10^{-2}$ la 20°C	$2,01 \cdot 10^{-2}$ la 400°C

**DETERMINAREA FUNCȚIEI DE VARIAȚIE DUPĂ r A VITEZEI
LICHIDULUI ELECTROCONDUCTOR ÎN ZONA DE POMPARE
INELARĂ (rezolvarea ecuației (3.41))**

Ecuția de forma:

$$r^2 \cdot \frac{d^2 v}{dr^2} + r \frac{dv}{dr} = K_1 \cdot r^2 (r - C_2)^2 - K_2 \cdot r^2 \quad (3.41)$$

este o ecuație de tip Euler.

Dacă se notează:

$$s = \ln r, \quad r > 0 \quad (A4.1)$$

rezultă:

$$\frac{dv}{dr} = \frac{dv}{ds} \cdot \frac{ds}{dr} = \frac{1}{r} \cdot \frac{dv}{ds} \quad (A4.2)$$

și

$$\begin{aligned} \frac{d^2 v}{dr^2} &= \frac{d}{dr} \left(\frac{dv}{dr} \right) = \frac{d}{dr} \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{dv}{ds} \right) = -\frac{1}{r^2} \cdot \frac{dv}{ds} + \frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \left(\frac{dv}{ds} \right) = \\ &= -\frac{1}{r^2} \cdot \frac{dv}{ds} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{d^2 v}{ds^2} = \frac{1}{r^2} \left(\frac{d^2 v}{ds^2} - \frac{dv}{ds} \right) \end{aligned} \quad (A4.3)$$

În baza relațiilor (A4.1), (A4.2) și (A4.3) ecuația (3.41) devine:

$$\frac{d^2 v}{ds^2} = K_1 \cdot e^{2 \cdot s} (e^{2s} - 2 \cdot C_2 \cdot e^s + C_2^2) - K_2 \cdot e^{2s} \quad (A4.4)$$

de unde, prin efectuarea calculelor, rezultă:

$$\frac{d^2 v}{ds^2} = K_1 \cdot e^{4 \cdot s} - 2 \cdot K_1 \cdot C_2 \cdot e^{3 \cdot s} + (K_1 \cdot C_2^2 - K_2) \cdot e^{2s} \quad (A4.5)$$

Integrând în raport cu s se obține succesiv:

$$\frac{dv}{ds} = \frac{K_1}{4} \cdot e^{4s} - \frac{2 \cdot K_1 \cdot C_2}{3} \cdot e^{3s} + \frac{K_1 \cdot C_2^2 - K_2}{2} \cdot e^{2s} + K_3 \quad (A4.6)$$

$$v(s) = \frac{K_1}{16} \cdot e^{4s} - \frac{2 \cdot K_1 \cdot C_2}{9} \cdot e^{3s} + \frac{K_1 \cdot C_2^2 - K_2}{4} \cdot e^{2s} + K_3 \cdot s + K_4 \quad (A4.7)$$

În relațiile (A4.6) și (A4.7) K_3 și K_4 sunt constante de integrare.

Din relațiile (A4.1) și (A4.7) rezultă $v(r)$:

$$v(r) = \frac{K_1}{16} \cdot r^4 - \frac{2 \cdot K_1 \cdot C_2}{9} \cdot r^3 + \frac{K_1 \cdot C_2^2 - K_2}{4} \cdot r^2 + K_3 \cdot \ln r + K_4 \quad (\text{A4.8})$$

Constantele de integrare K_3 și K_4 se determină din condițiile pe frontieră:

$$\begin{cases} v(r_1) = 0 \\ v'(r_1) = 0 \end{cases} \quad (\text{A4.9})$$

obținându-se:

$$K_3 = \frac{1}{\ln \frac{r_1}{R_1}} \cdot \left[\frac{K_1}{16} (R_1^4 - r_1^4) - \frac{2 \cdot K_1 \cdot C_2}{9} (R_1^3 - r_1^3) + \frac{K_1 \cdot C_2^2 - K_2}{4} (R_1^2 - r_1^2) \right] \quad (\text{A4.10})$$

$$K_4 = -\frac{K_1}{16} \cdot r_1^4 + \frac{2 \cdot K_1 \cdot C_2}{9} \cdot r_1^3 - \frac{K_1 \cdot C_2^2 - K_2}{4} \cdot r_1^2 - \frac{\ln r_1}{\ln \frac{r_1}{R_1}} \cdot \left[\frac{K_1}{16} (R_1^4 - r_1^4) - \frac{2 \cdot K_1 \cdot C_2}{9} (R_1^3 - r_1^3) + \frac{K_1 \cdot C_2^2 - K_2}{4} (R_1^2 - r_1^2) \right] \quad (\text{A4.11})$$

Înlocuind expresiile constantelor K_3 și K_4 în relația (A4.8) se obține funcția de variație după r a vitezei lichidului electroconductor în zona de pompare inelară:

$$v(r) = \frac{K_1}{16} (r^4 - r_1^4) - \frac{2 \cdot K_1 \cdot C_2}{9} (r^3 - r_1^3) + \frac{K_1 \cdot C_2^2 - K_2}{4} (r^2 - r_1^2) + \frac{\ln \frac{r}{r_1}}{\ln \frac{r_1}{R_1}} \cdot \left[\frac{K_1}{16} (R_1^4 - r_1^4) - \frac{2 \cdot K_1 \cdot C_2}{9} (R_1^3 - r_1^3) + \frac{K_1 \cdot C_2^2 - K_2}{4} (R_1^2 - r_1^2) \right] \quad (\text{A4.12})$$

VALOAREA CUANTILEI z_{α_0} CU PROBABILITATEA α_0
DE A FI DEPĂȘITĂ [79]

α_0	z_{α_0}
$5 \cdot 10^{-1}$ (50%)	0
10^{-1} (10%)	1,282
$5 \cdot 10^{-2}$ (5%)	1,64
10^{-2} (1%)	2,326
$5 \cdot 10^{-3}$ (0,5%)	2,556
10^{-3} (0,1%)	3,090
$5 \cdot 10^{-4}$ (0,05%)	3,258
10^{-4} (0,01%)	3,719
$5 \cdot 10^{-5}$	3,871
10^{-5}	4,265
10^{-6}	4,753
10^{-7}	5,199
10^{-8}	5,610

VALORI ORIENTATIVE PENTRU COEFICIENTUL GEOMETRIC K_g
 ÎN FUNCȚIE DE DIAMETRUL D_{Fe} ȘI NUMĂRUL DE TREPTE n_{tr}
 ALE COLOANEI MIEZULUI FEROMAGNETIC [35]

D_{Fe} [mm]	<80	80	90÷140	160÷220	240÷260	280÷320
n_{tr}	3	4	5+6	7+8	7	8
n_c	-	-	-	-	1	2
K_g	0,851	0,877	0,915÷ ÷0,920	0,930÷ ÷0,935	0,80	0,820
Miez strâns cu înfășurarea și cu pene și fără canale de răcire					Miez strâns cu bandă de sticlă sau de oțel și n_c canale de răcire	

A. CALCULUL RELUCTANTELOR ȘI REACTANTELOR MAGNETICE CE INTERVIN ÎN SCHEMA ELECTRICĂ ECHIVALENTĂ DIN Fig.3.10.

Reluctanța magnetică a întrefierului corespunzător uneia din coloanele laterale ale miezului feromagnetic este:

$$R_{\delta 1c} = \frac{\delta}{\mu_0 \cdot a_{Fe} \cdot C_{Fe}} \quad (A7.1)$$

Reluctanța magnetică de dispersie între coloana centrală și o coloană laterală a miezului feromagnetic, $R_{\sigma 1c}$, se obține cu relația:

$$R_{\sigma 1c} = \frac{l_{Fe}}{\mu_0 \cdot h_{Fe} \cdot a_{Fe}} \quad (A7.2)$$

În relațiile (A7.1) și (A7.2) s-au neglijat umflările de flux magnetic la întrefier și între coloane.

Reactanța magnetică a întrefierului (ocupat de lichidul electroconductor) corespunzător uneia din ramurile miezului feromagnetic se aproximează cu relația [147]:

$$X_{\delta 1c} \approx (0,16, \dots, 0,72) \cdot R_{\delta 1c} \quad (A7.3)$$

Cu prima teoremă a lui Kirchhoff scrisă pentru nodul 1 de rețea rezultă relația:

$$\Phi_{Fecmc} = \Phi_{\sigma mc} + \Phi_{1mc} \quad (A7.4)$$

Aplicând apoi teorema a 2-a a lui Kirchhoff ochiului 1 de rețea se obține (conform fig.3.10.c) relația:

$$\Phi_{1mc} \cdot \left(\frac{R_{\delta 1c}}{4} + j \frac{X_{\delta 1c}}{4} \right) = \Phi_{\sigma mc} \cdot \frac{R_{\sigma 1c}}{4} \quad (\text{A7.5})$$

Relațiile (A7.4) și (A7.5) formează un sistem de ecuații prin a căror rezolvare rezultă fluxul magnetic maxim ce străbate întrefierul de la coloana centrală la coloanele laterale ale miezului feromagnetic.

$$\Phi_{1mc} = \frac{R_{\sigma 1c}}{R_{\sigma 1c} + R_{\delta 1c} + j \cdot X_{\delta 1c}} \cdot \Phi_{Fecmc} = \quad (\text{A7.6})$$

$$= \left[\frac{R_{\sigma 1c} \cdot (R_{\sigma 1c} + R_{\delta 1c})}{(R_{\sigma 1c} + R_{\delta 1c})^2 + X_{\delta 1c}^2} - j \frac{X_{\delta 1c} \cdot R_{\sigma 1c}}{(R_{\sigma 1c} + R_{\delta 1c})^2 + X_{\delta 1c}^2} \right] \cdot \Phi_{Fecmc}$$

și fluxul magnetic maxim de dispersie între coloana centrală și coloanele laterale:

$$\Phi_{\sigma mc} = \left[1 - \frac{R_{\sigma 1c} \cdot (R_{\sigma 1c} + R_{\delta 1c})}{(R_{\sigma 1c} + R_{\delta 1c})^2 + X_{\delta 1c}^2} - j \frac{X_{\delta 1c} \cdot R_{\sigma 1c}}{(R_{\delta 1c} + R_{\sigma 1c})^2 + X_{\delta 1c}^2} \right] \cdot \Phi_{Fecmc}$$

(A7.7)

Intensitatea câmpului magnetic în fiecare din porțiunile circuitului magnetic se determină, în funcție de inducția magnetică în porțiunea respectivă, utilizând curba de magnetizare $H=f(B)$ a materialului din care este confecționat miezul

feromagnetic.

Relațiile de calcul ale inducției magnetice și intensității câmpului magnetic în diverse porțiuni ale circuitului magnetic al pompei magnetohidrodinamice de repulsie sunt următoarele:

- pentru porțiunea de circuit magnetic parcursă de fluxul

Φ_{Fecmc} :

$$B_{Fecmc} = \frac{\Phi_{Fecmc}}{a_{Fe}} \quad (A7.8)$$

$$H_{Fecmc} = f(B_{Fecmc}) \quad (A7.9)$$

- pentru porțiunea de circuit magnetic străbătută de fluxul

Φ_{1mc} :

$$B_{1mc} = \frac{\Phi_{1mc}}{4 \cdot a_{Fe} \cdot C_{Fe}} \quad (A7.10)$$

$$H_{1mc} = f(B_{1mc}) \quad (A7.11)$$

Reluctanțele magnetice ale porțiunilor de fier din circuitul magnetic se determină cu relațiile:

$$R_{f1c} = \frac{l_{Fe} - \delta + C_{Fe}}{\mu_{1mc} \cdot a_{Fe} \cdot C_{Fe}} \quad (A7.12)$$

$$R_{f5c} = \frac{\frac{C_{Fe}}{2} + \frac{a_{Fe}}{2}}{\mu_{1mc} \cdot a_{Fe} \cdot C_{Fe}} \quad (A7.13)$$

$$R_{f2c} = \frac{h_{Fe}}{\mu_{Fecmc} \cdot a_{Fe} \cdot C_{Fe}} \quad (A7.14)$$

$$R_{f3c} = \frac{C_{Fe} + l_{Fe} + \frac{a_{Fe}}{2} + \frac{C_{Fe}}{2}}{\mu_{Fecmc} \cdot a_{Fe} \cdot C_{Fe}} \quad (A7.15)$$

$$R_{f4c} = \frac{h_{Fe}}{\mu_{Fecmc} \cdot a_{Fe}^2} \quad (A7.16)$$

în care s-au notat cu μ_{1mc} și μ_{Fecmc} permeabilitățile magnetice ale fierului din porțiunile respective de circuit magnetic. Aceste permeabilități magnetice se calculează cu relațiile:

$$\mu_{1mc} = \frac{B_{1mc}}{H_{1mc}} \quad (A7.17)$$

și

$$\mu_{Fecmc} = \frac{B_{Fecmc}}{H_{Fecmc}} \quad (A7.18)$$

Reactanțele magnetice ale porțiunilor de fier din circuitul magnetic se determină pe baza pierderilor specifice în fier în porțiunile respective, astfel:

$$X_{f1c} = \frac{P_{f1c} \cdot \rho_{dFe} \cdot K_{Fe} \cdot a_{Fe} \cdot C_{Fe} \cdot (l_{Fe} - \delta + C_{Fe})}{\pi \cdot f \cdot \Phi_{1mc}^2} \quad (A7.19)$$

$$X_{f5c} = \frac{P_{f1c} \cdot \rho_{dFe} \cdot K_{Fe} \cdot a_{Fe} \cdot C_{Fe} \cdot \left(\frac{C_{Fe}}{2} + \frac{a_{Fe}}{2} \right)}{\pi \cdot f \cdot \Phi_{1mc}^2} \quad (A7.20)$$

$$X_{f2c} = \frac{P_{f2c} \cdot \rho_{dFe} \cdot K_{Fe} \cdot a_{Fe} \cdot C_{Fe} \cdot h_{Fe}}{\pi \cdot f \cdot \Phi_{Fecmc}^2} \quad (A7.21)$$

$$X_{f3c} = \frac{P_{f2c} \cdot \rho_{dFe} \cdot K_{Fe} \cdot a_{Fe} \cdot C_{Fe} \cdot \left(C_{Fe} + l_{Fe} + \frac{a_{Fe}}{2} + \frac{C_{Fe}}{2} \right)}{\pi \cdot f \cdot \Phi_{Fecmc}^2} \quad (A7.22)$$

$$X_{f4c} = \frac{P_{f2c} \cdot \rho_{dFe} \cdot K_{Fe} \cdot a_{Fe}^2 \cdot h_{Fe}}{\pi \cdot f \cdot \Phi_{Fecmc}^2} \quad (A7.23)$$

Mărimile care intervin în relațiile (A7.19)... (A7.23) au semnificațiile precizate anterior, iar P_{f1c} și P_{f2c} se determină în funcție de inducție utilizând curba din ANEXA-2.

B. CALCULUL IMPEDANȚEI MAGNETICE ECHIVALENTE A CIRCUITULUI MAGNETIC AVÂND SCHEMA ELECTRICĂ ECHIVALENTĂ DIN Fig.3.11.

Calculul impedanței magnetice echivalente Z_{ed} se face parcurgând succesiv următoarele relații:

$$R_{\delta 1d} = \frac{1}{\frac{2 \cdot \mu_0 \cdot C_{Fe}}{\pi} \cdot \ln \frac{D_{Fe}/2 + \delta}{D_{Fe}/2}} \quad (\text{A7.24})$$

$$R_{\sigma 1d} \approx \frac{l_{Fe}}{\mu_0 \cdot h_{Fe} \cdot d_{Fe}} \quad (\text{A7.25})$$

$$X_{\delta 1d} \approx (0,16, \dots, 0,72) \cdot R_{\delta 1d} \quad (\text{A7.26})$$

$$\Phi_{1md} = \left[\frac{R_{\sigma 1d} \cdot (R_{\sigma 1d} + R_{\delta 1d})}{(R_{\sigma 1d} + R_{\delta 1d})^2 + X_{\delta 1d}^2} - j \frac{X_{\delta 1d} \cdot R_{\sigma 1d}}{(R_{\sigma 1d} + R_{\delta 1d})^2 + X_{\delta 1d}^2} \right] \cdot \Phi_{Fecmd} \quad (\text{A7.27})$$

$$\Phi_{\sigma md} = \Phi_{Fecmd} - \Phi_{1md} \quad (\text{A7.28})$$

$$B_{Fecmd} = \frac{\Phi_{Fecmd}}{\frac{\pi \cdot D_{Fe}^2}{4}} \quad (\text{A7.29})$$

$$H_{Fecmd} = f(B_{Fecmd}) \quad (\text{A7.30})$$

$$\mu_{Fecmd} = \frac{B_{Fecmd}}{H_{Fecmd}} \quad (\text{A7.31})$$

$$B_{1md} = \frac{\Phi_{1md}}{4 \cdot d_{Fe} \cdot C_{Fe}} \quad (\text{A7.32})$$

$$H_{1md} = f(B_{1md}) \quad (A7.33)$$

$$\mu_{1md} = \frac{B_{1md}}{H_{1md}} \quad (A7.34)$$

$$R_{f1d} \approx \frac{l_{Fe} - \delta + C_{Fe}}{\mu_{1md} \cdot d_{Fe} \cdot C_{Fe}} \quad (A7.35)$$

$$R_{f5d} \approx \frac{\frac{C_{Fe}}{2} + \frac{D_{Fe}}{2}}{\mu_{1md} \cdot d_{Fe} \cdot C_{Fe}} \quad (A7.36)$$

$$R_{f2d} = \frac{h_{Fe}}{\mu_{Fecmd} \cdot d_{Fe} \cdot C_{Fe}} \quad (A7.37)$$

$$R_{f3d} = \frac{C_{Fe} + l_{Fe} + \frac{D_{Fe}}{2} + \frac{C_{Fe}}{2}}{\mu_{Fecmd} \cdot d_{Fe} \cdot C_{Fe}} \quad (A7.38)$$

$$R_{f4d} = \frac{h_{Fe}}{\mu_{Fecmd} \cdot \frac{\pi \cdot D_{Fe}^2}{4}} \quad (A7.39)$$

$$X_{f1d} = \frac{P_{f1d} \cdot \rho_{dFe} \cdot K_{Fe} \cdot d_{Fe} \cdot C_{Fe} \cdot (l_{Fe} - \delta + C_{Fe})}{\pi \cdot f \cdot \phi_{1md}^2} \quad (A7.40)$$

$$X_{f5d} = \frac{P_{f1d} \cdot \rho_{dFe} \cdot K_{Fe} \cdot d_{Fe} \cdot C_{Fe} \cdot \left(\frac{C_{Fe}}{2} + \frac{D_{Fe}}{2} \right)}{\pi \cdot f \cdot \phi_{1md}^2} \quad (A7.41)$$

$$X_{f2d} = \frac{P_{f2d} \cdot \rho_{dFe} \cdot K_{Fe} \cdot d_{Fe} \cdot C_{Fe} \cdot h_{Fe}}{\pi \cdot f \cdot \Phi_{Fecmd}^2} \quad (A7.42)$$

$$X_{f3d} = \frac{P_{f2d} \cdot \rho_{dFe} \cdot K_{Fe} \cdot d_{Fe} \cdot C_{Fe} \cdot \left(C_{Fe} + l_{Fe} + \frac{D_{Fe}}{2} + \frac{C_{Fe}}{2} \right)}{\pi \cdot f \cdot \Phi_{Fecmd}^2} \quad (A7.43)$$

$$X_{f4d} = \frac{P_{f2d} \cdot \rho_{dFe} \cdot K_{Fe} \cdot h_{Fe} \cdot \frac{\pi \cdot D_{Fe}^2}{4}}{\pi \cdot f \cdot \Phi_{Fecmd}^2} \quad (A7.44)$$

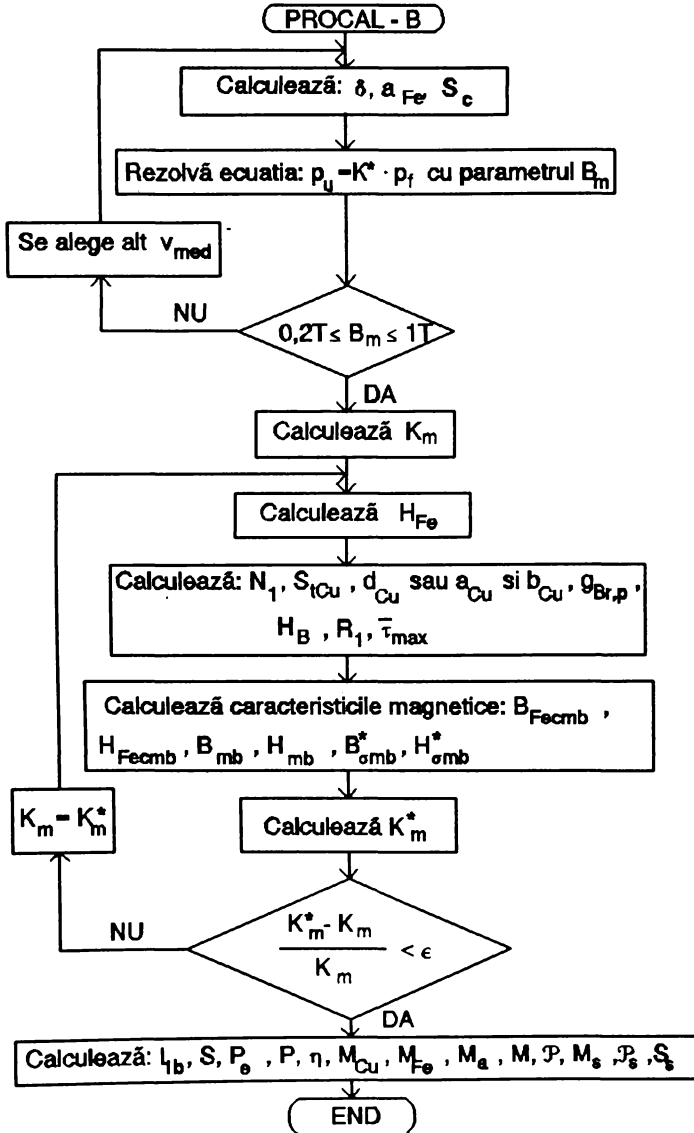
$$Z_{1d} = \frac{R_{f2d}}{4} + \frac{R_{f3d}}{4} + R_{f4d} + j \cdot \left(\frac{X_{f2d}}{4} + \frac{X_{f3d}}{4} + X_{f4d} \right) \quad (A7.45)$$

$$Z_{2d} = \frac{R_{f1d}}{4} + \frac{R_{f5d}}{4} + \frac{R_{\delta 1d}}{4} + j \cdot \left(\frac{X_{f1d}}{4} + \frac{X_{f5d}}{4} + \frac{X_{\delta 1d}}{4} \right) \quad (A7.46)$$

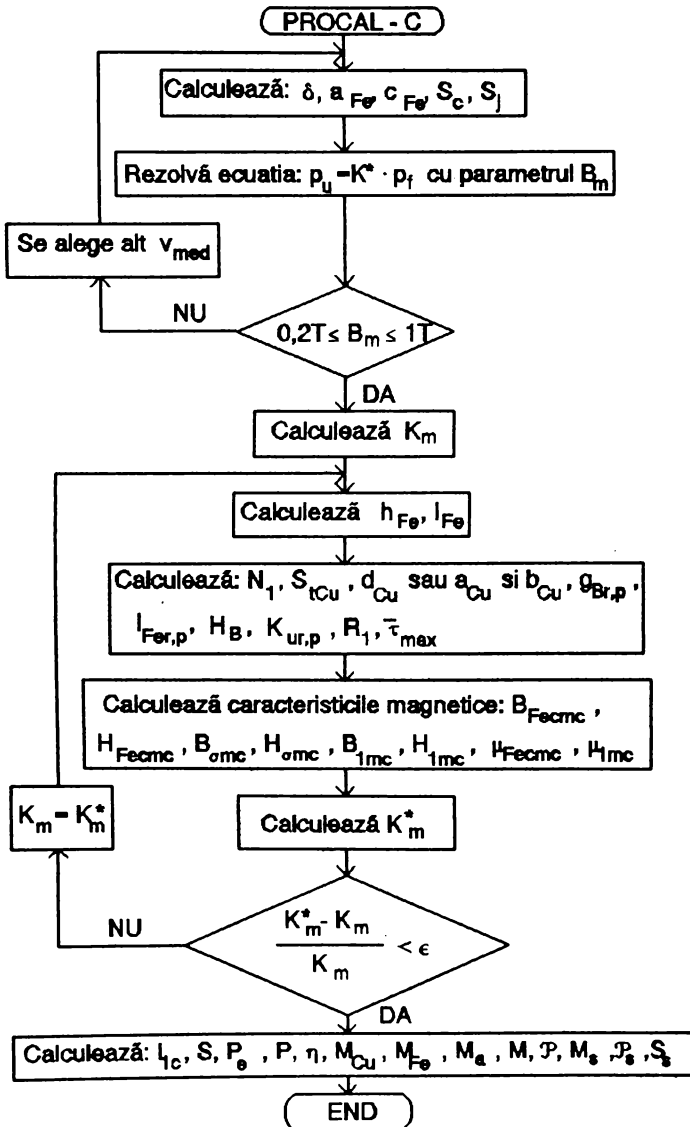
$$Z_{ed} = Z_{1d} + \frac{Z_{2d} \cdot \frac{R_{\sigma 1d}}{4}}{Z_{2d} + \frac{R_{\sigma 1d}}{4}} \quad (A7.47)$$

Mărimile care intervin în relațiile (A7.24)... (A7.47) și poartă indicele *d* au aceleași semnificații ca și mărimile similare deja prezentate ce poartă indicele "c".

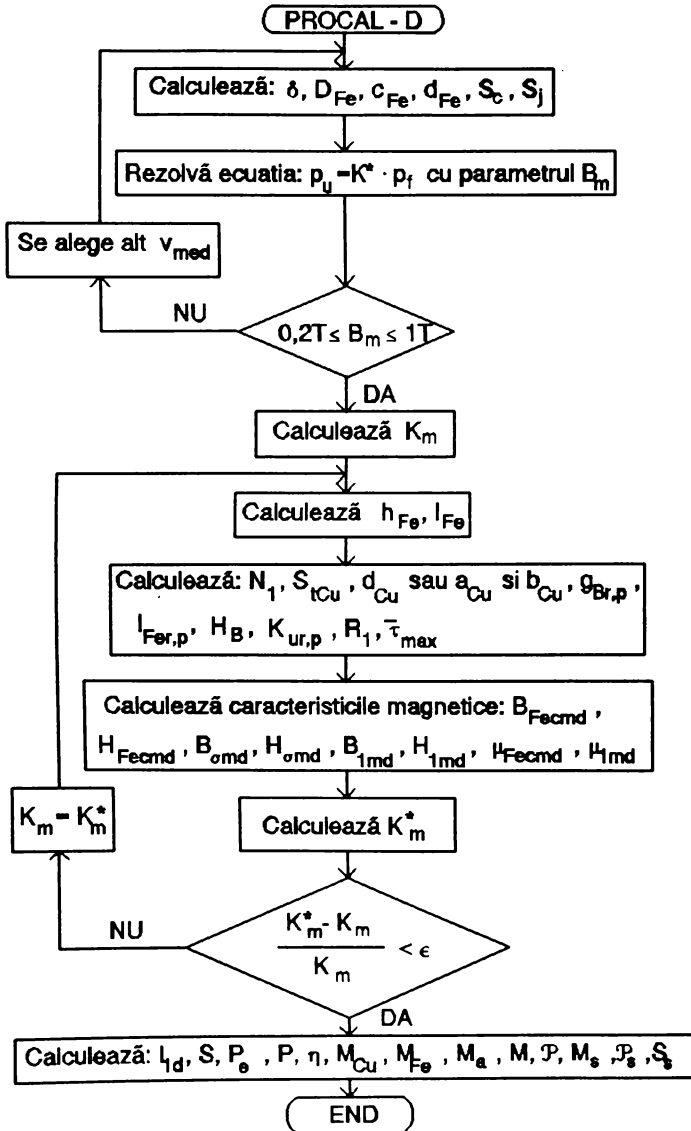
PROGRAMUL DE PROIECTARE ASISTATĂ DE CALCULATOR A
DISPOZITIVELOR ELECTROMAGNETICE ALE POMPELOR
MAGNETOHIDRODINAMICE DE REPULSIE.
PROCEDURA PROCAL-B DE CALCUL ELECTROMAGNETIC PROPRIU-ZIS



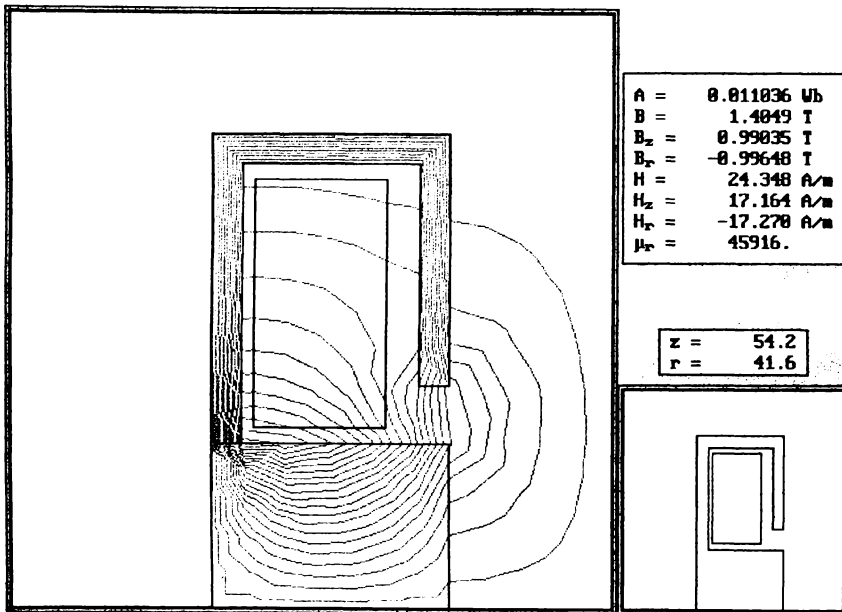
PROGRAMUL DE PROIECTARE ASISTATĂ DE CALCULATOR A
DISPOZITIVELOR ELECTROMAGNETICE ALE POMPELOR
MAGNETOHIDRODINAMICE DE REPULSIE.
PROCEDURA PROCAL-C DE CALCUL ELECTROMAGNETIC PROPRIU-ZIS



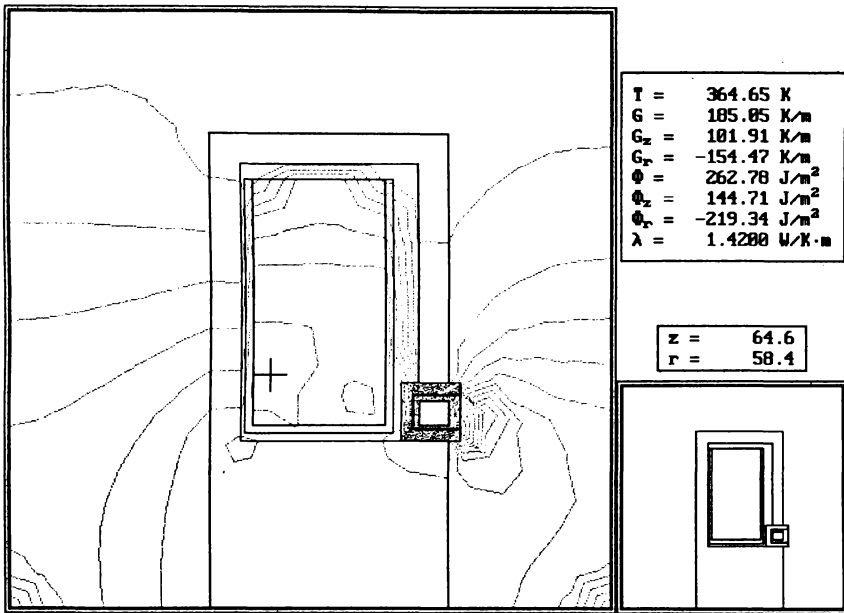
PROGRAMUL DE PROIECTARE ASISTATĂ DE CALCULATOR A
DISPOZITIVELOR ELECTROMAGNETICE ALE POMPELOR
MAGNETOHIDRODINAMICE DE REPULSIE.
PROCEDURA PROCAL-D DE CALCUL ELECTROMAGNETIC PROPRIU-ZIS



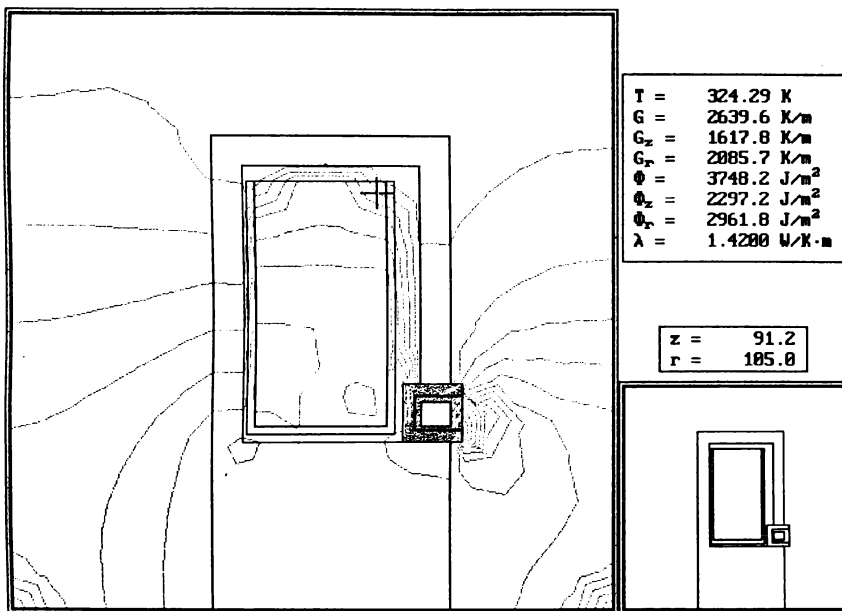
REZULTATE ALE ANALIZEI NUMERICE DE CÂMP MAGNETIC
ȘI CÂMP TERMIC LA DISPOZITIVUL ELECTROMAGNETIC
DE VEHICULARE A PLUMBULUI



Locate the point or <ESC> to finish (<TAB> = keyboard input)



Locate the point or <ESC> to finish (<TAB> = keyboard input)



Locate the point or <ESC> to finish (<TAB> = keyboard input)

DESPRE AUTOR

1. Numele și prenumele: VĂTĂU DORU
2. Data și locul nașterii: 1 ianuarie 1962, Birda, județul Timiș
3. Studii:
 - ◆ 1976 - 1980 Liceul "Constantin Diaconovici Loga" din Timișoara
 - ◆ 1981 - 1986 Institutul Politehnic "Traian Vuia" din Timișoara, Facultatea de Electrotehnică
 - ◆ 1990 Specializare în Marketing Internațional
4. Experiența profesională:
 - ◆ 1986 - 1992 Inginer proiectant la S.C. AEM-S.A. Timișoara
 - ◆ 1990 - 1992 Cadru didactic asociat al Universității Tehnice Timișoara, Facultatea de Electrotehnică, Catedra de Electroenergetică
 - ◆ 1992 - 1996 Asistent la Universitatea "Politehnica" Timișoara, Facultatea de Electrotehnică, Catedra de Electroenergetică
 - ◆ 1996 - în prezent Șef de lucrări la Universitatea "Politehnica" Timișoara, Facultatea de Electrotehnică, Catedra de Electroenergetică
 - ◆ număr de lucrări: 15 lucrări științifice publicate în periodice, 1 culegere de probleme, 10 lucrări științifice comunicate și nepublicate, 9 inovații, 1 prototip omologat, 7 contracte de cercetare științifică.
 - ◆ din 1990 doctorand în specialitatea Mașini, Aparate și Acționări Electrice
 - ◆ a efectuat cercetări în domeniul Aparatelor și Echipa mentelor Electrice, în domeniul Magnetohidrodinamicii și în domeniul Utilizării calculatoarelor în electrotehnică.