

MINISTERUL EDUCATIEI SI INVATAMINTULUI  
INSTITUTUL POLITEHNIC "TRAIAN VUIA" TIMISOARA  
Facultatea de electrotehnică

ing. CONSTANTIN OPREA

CONTRIBUTII LA STUDIUL SI PROIECTAREA  
OPTIMALA A BERINELOR ELECTROMAGNETICE CU PUL-  
BERI

- teză de doctorat -

BIBLIOTECA CENTRALĂ  
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"  
TIMIȘOARA

Coordonator științific  
Prof.dr.ing. IOAN NOVAC

Timișoara  
- 1988 -

INSTITUTUL POLITEHNIC "TRAIAN VUIA" TIMIȘOARA

53666  
251 H

"Exprim sincere mulțumiri și cele mai profunde sentimente de recunoștință coordonatorului meu științific, Prof.Dr.ing. IOAN NOVAC, pentru îndrumarea competentă și plină de înțelegere pe toată perioada cercetării și redactării acestei lucrări.

Aceleași mulțumiri le exprim și pentru foștii colegi și conducerea I.M.M.U.M. Baia Mare, care m-au ajutat, cu sfaturi prietenești și principiale, la rezolvarea unor probleme de moment, la executarea și experimentarea dispozitivelor, cu o mențiune pentru ing. LADISLAU ROTH și colectivul de la standul de probe al uzinei."

## I N T R O D U C E R E

Dezvoltarea într-un ritm susținut a industriei constructoare de mașini și a celorlalte ramuri industriale (electrotehnică, electronică, automatizări, calculatoare, etc.) în țara noastră, în ultimii douăzeci de ani, a impus cu necesitate executarea unor aparate și dispozitive cu caracter mai special, necesare în procesele de producție, pentru buna desfășurare a acestora.

Astfel, utilizarea unor dispozitive de frinare în diferitele procese industriale este impusă de necesitatea realizării în primul rând a unor gânduri de încercare la supraîncălziri de lungă durată pentru cazul diverselor instalații, precum și pentru realizarea unor opriri rapide ale unor utilaje care nu pot permite a continua operațiile după deconectarea motorului de antrenare sau după atingerea unui anumit punct limită. De asemenea, dispozitivele de frinare se pot utiliza pentru a realiza reglaj lent al vitezelor de rotație sau liniare ale unor motoare, fie electrice, fie de altă natură, cu recuperare sau fără recuperare de energie, în funcție de posibilitățile existente.

În prezent există mai multe metode de frinare, diferențierea acestora făcându-se în funcție de agentul de lucru utilizat pentru funcționarea dispozitivului propriu-zis. Astfel, se pot realiza frînări cu ajutorul unor dispozitive mecanice, hidraulice, pneumatice sau electrice.

Frinarea mecanică se realizează în general cu frine cu saboți (frine Proni), modificarea cuplului de frinare realizându-se prin adăugarea unor contragreutăți. Aceste frine au dezavantajul unei uzuri rapide a suprafețelor de frinare, precum și faptul că nu se poate realiza o frinare uniformă, motiv pentru care utilizarea lor actuală este redusă /7, 15, 46/.

Frinarea cu ajutorul dispozitivelor hidraulice și pneumatice necesită realizarea unor instalații tehnologice cu un grad de finețe ridicat punând probleme deosebite în privința etanșărilor, necesită dispozitive și utilaje speciale pentru pomparea fluidului utilizat, ceea ce duce la creșterea costului de producție al acestora. Acesta este motivul pentru care, în prezent, acestea se utilizează destul de rar.

Frinarea pe cale electrică tinde să înlocuiască din ce în

ce mai mult celelalte metode de frinare, datorită unei construcții relativ simple, al unei fiabilități ridicate, a unui cost de producție redus și utilizării unui agent de lucru ieftin.

Utilizând ca agent de lucru energia electrică, frinarea se poate realiza fie cu dispozitive speciale executate în acest scop ( frâne electrice ), fie cu ajutorul unor mașini electrice obișnuite de curent continuu sau curent alternativ prin trecerea acestora în regim de generatoare electrice în perioada frinării, cu sau fără recuperare de energie.

Datorită faptului că la puteri mari ( cuplu de frinare ridicat ) gabaritul și, implicit costul de producție al mașinilor electrice uzuale este ridicat, cu toate că este posibilă recuperarea de energie, majoritatea constructorilor tind să utilizeze pentru frinare dispozitive realizate în acest scop cunoscute sub denumirea de frâne electromagnetice.

Frânele electromagnetice utilizate în prezent se pot împărți în două mari categorii și anume:

- frâne electromagnetice cu discuri ( cu fricțiune );
- frâne electromagnetice de inducție ( cu curenți turbionari, cu curenți Foucault, cu alunecare ).

#### Frâne electromagnetice cu discuri

Principiul de funcționare al frinelor electromagnetice cu discuri are la bază utilizarea forțelor de frecare ce iau naștere în momentul în care două suprafețe vin în contact datorită forței de atracție exercitată cu ajutorul unui electromagnet. Suprafețele de frecare ale celor două părți ce vin în contact pot să aibă forme plane, cilindrice, mai rar conice.

Principial, în figura 1 /2/ se reprezintă o secțiune transversală printr-o frână electromagnetică cu discuri executată de uzina Dinamo din Moscova.

Constructiv, aceste tipuri de frâne se realizează din discul-1 sudat de armătură și discul-2 care este calat pe arborul motorului și poate să se deplaseze în direcție axială pe o pană glisantă. Pe ambele fețe ale discului-2, sînt fixate, prin nituire, garniturile de ferodou-3, care formează suprafețele de frecare. În corpul frinei se găsesc: electromagnetul cu bobina de excitație-6, corpul feromagnetic-5 și armătura-7. Corpul feromagnetic și armătura sînt turnate din oțel. În cazul în care înfășurarea bobinei nu este alimentată cu tensiune, arcul

-4 presează asupra armăturii și discul-2 este strins între discul  
-1 sudat la armătură și corpul frinei, efectuând în acest fel

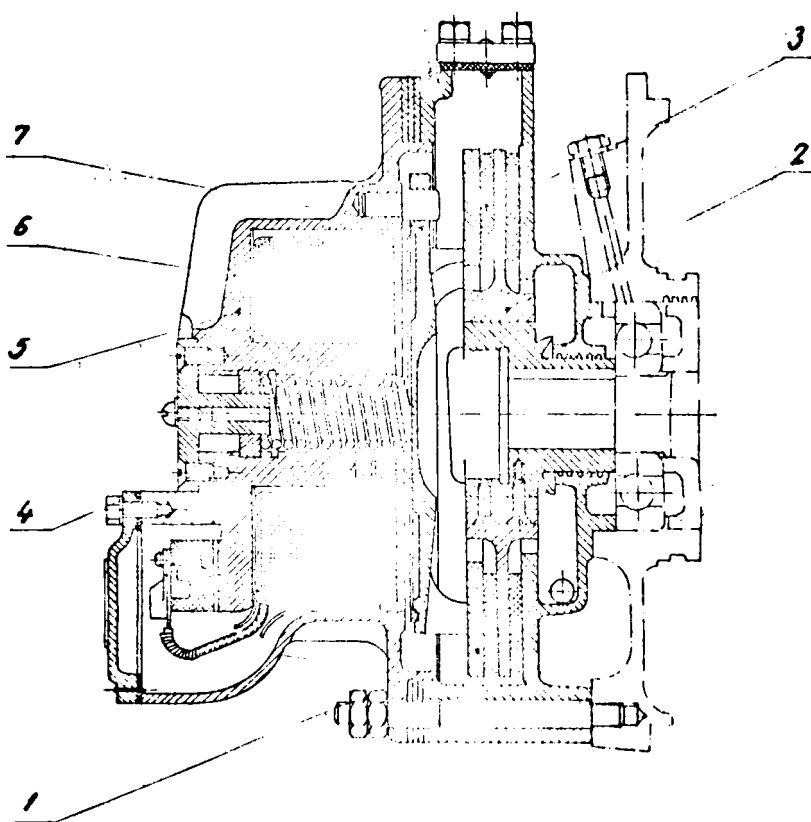


Fig.1. Secțiune transversală printr-o frână electro-  
magnetică cu discuri.

frinarea. La conectarea bobinei forța de atracție a electromag-  
netului învinge forța arcului realizând deblocarea frinei. În  
cazuri de necesitate, de exemplu la un deranjament în rețeaua  
electrică, frina poate fi deblocată manual, cu ajutorul unui  
șiner special.

Constructiv, aceste frâne se realizează cu un disc sau  
mai multe discuri, în varianta normal închise sau normal deschi-  
se. Au dezavantajul uzurii rapide a suprafețelor de frecare și  
încălzirea excesivă a acestora.

Problemele legate de proiectarea și construcția acestor  
tipuri de frâne sînt practic rezolvate în literatura de specia-  
litate, detalii găsindu-se în /2, 6, 61, 68, 69, 87, 88, 91/.

La noi în țară se execută cuplaje electromagnetice cu

discuri la I.M. Cugir, după o licență a firmei Binder Magnetic /6/ care ar putea fi adaptate și ca dispozitive de frinare.

#### Frâne electromagnetice de inducție

Deosebirea esențială între frânele electromagnetice de inducție și cele cu discuri ( fricțiune ) constă în faptul că primele nu mai prezintă suprafețe de frecare ce vin în contact, frinarea realizându-se pe baza fenomenului de inducție electromagnetică, ce duce la apariția de curenți turbionari în medii masive.

În categoria frinelor electromagnetice de inducție, în afară de motoarele electrice de inducție obișnuite se încadrează frânele electromagnetice cu alunecare ( cu curenți turbionari ) și frânele electromagnetice cu pulbere, împărțirea în cele două categorii fiind făcută doar din considerente de exprimare, deoarece, principalul funcționarea celor două tipuri de frâne este aproximativ aceeași, diferind doar principiul lor constructiv.

#### Frâne electromagnetice cu alunecare /15, 61/

Aceste tipuri de frâne sînt cunoscute în mod curent în literatura de specialitate, și sub denumirea de frâne cu curenți turbionari sau cu curenți Foucault.

Funcționarea unei frîne electromagnetice cu alunecare se poate descrie, conform figurii 2 /66/ astfel:

- considerînd că dispozitivul de frinare este cuplat într-un proces tehnologic, rotorul-2 al frînei se va roti cu o turație constantă. Dacă dorim să realizăm frinarea, atunci se va cupla bobina de excitație-6 în marea de tensiune adecvată. Curențul de excitație fiind astfel realizat, acesta va produce fluxul magnetic principal care se închide prin întrefier între statorul-1 și rotorul-2 al frînei. Sistemul magnetic ( statorul ) care include și bobina de excitație este prevăzut cu dinți și canale în cazul în care se face uz de un rotor neted. În cazul în care rotorul este prevăzut cu canale, atunci statorul poate fi neted.

Indusul ( rotorul ) masiv al frînei poate fi considerat ca un număr infinit de conductoare legate în paralel, intersectate de liniile inducției magnetice ale sistemului magnetic. Tensiunea electromotoare indusă în aceste condiții în stator duce la apariția în acesta a unor curenți turbionari astfel că, asupra unui conductor va acționa o forță ce tinde să antreneze sistemul magnetic în sensul de rotație al rotorului. Datorită faptului că sistemul magnetic al frînei este fix față de rotor,

aparitia curentilor turbionari și implicit a forței de rotație va da naștere unui cuplu de frinare, a cărui valoare depinde de curentul de excitație, care va reduce treptat viteza de rotație a rotorului; acest cuplu este maxim la valoarea maximă a curentului.

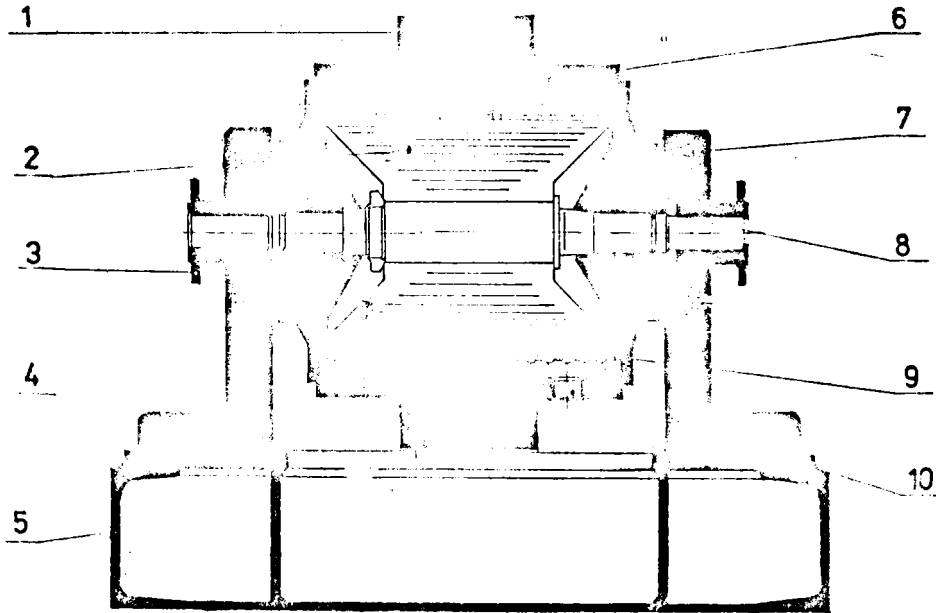


Fig.2. Frină electromagnetică cu alunecare

Ținând cont de faptul că la funcționarea dispozitivului ca frină ( la conectarea bobinei de excitație ) alunecarea este maximă, cuplul de frinare în acel moment va avea valori apreciable. De aceea, trebuie să se țină seama că, pe măsură ce turația scade, se va micșora și cuplul de frinare, iar la sfârșit va deveni zero ( deoarece și alunecarea este zero ).

În figura 2 s-au mai pus în evidență reperaile: flanșă cuplare-3; orificiu intrare apă-4; șasiu-5; lagăr oscilant-7; lagăr rotor-8; canale de recirculare apă-9 și orificiu ieșire apă-10.

Datorită faptului că la momente de frinare mari și o funcționare îndelungată, cantitatea de căldură degajată de dispozitiv este apreciabilă, ceea ce ar putea duce la distrugerea sau deteriorarea parțială a acestuia ( bobină de excitație, lagăre, etc. ) e necesar să se prevadă instalații auxiliare pentru răcire. În acest scop se adoptă fie metoda de suflare forțată de aer rece

apare părțile supuse încălzirii, fie prin recircularea unui lichid de răcire prin canale speciale din circuitul magnetic.

Frinele electromagnetice cu alunecare se construiesc în foarte multe variante, acestea diferențiindu-se între ele prin: modul de realizare al inductorului ( poli de polaritate alternanți și poli de aceeași polaritate ), modul de realizare al indusului ( indus masiv cu suprafață cilindrică netedă, indus cu canale radiale sau axiale, indus sub formă de pahar pentru puteri mici, etc. ), cu sau fără răcire suplimentară, cu una sau mai multe bobine de excitație, cu lagăre de alunecare sau de rostogolire, ș.a.

Dintre avantajele acestor tipuri de frine s-ar putea scoate în evidență următoarele:

- construcție simplă și preț de producție scăzut datorită unor economii importante de cupru și de oțel electrotehnic, inductorul și indusul putându-se executa din oțel turnat;

- întreținere simplă și lipsa unor piese supuse uzurii;

- putere de comandă redusă (2 - 3%) din puterea transmisă și comandă simplă;

- posibilitatea de pornire progresivă și reglarea progresivă fără trepte a vitezei de rotație și cuplului transmis.

Față de avantajele enumerate, frinele electromagnetice cu alunecare tind să fie înlocuite cu frinele electromagnetice cu pulberi datorită următoarelor dezavantaje:

- dimensiuni de gabarit și greutate mari;

- inerție mai mare datorită efectului curenților turbionari ce iau naștere în circuitele magnetice masive din oțel turnat, în timpul proceselor tranzitorii;

- stabilitate redusă a caracteristicilor mecanice la variația temperaturii din cauza variației rezistivității materialului indusului și a mărimii întrefierului;

- realizarea tehnologică a unor întrefieruri mici;

- existența pierderilor în caz de funcționare îndelungată în regim de alunecare;

- imposibilitatea obținerii unui cuplu de frinare constant la excitație constantă în funcție de viteza de rotație;

- scăderea considerabilă a momentului de frinare la viteze de rotație reduse și anularea acestuia la viteză de rotație nulă.

Cu privire la construcția, proiectarea și utilizarea frinelor electromagnetice cu alunecare, detalii suplimentare se



pot găsi în /8, 12, 21, 24, 26, 28, 36, 38, 39, 92, 95/.

### Frâne electromagnetice cu pulbere\*

FEP reprezintă în mare o variantă a frinelor cu fricțiune sincrone și asincrone /22/, deosebirea esențială constând din faptul că în întrefier, acestea au o umplură din pulbere feromagnetică care este tratată cu o serie de substanțe, în esență fiind vorba de o pulbere obținută pe bază de fier.

FEP îmbină toate particularitățile pozitive ale celorlalte tipuri de frâne și permit să se realizeze sau o cuplare rigidă (în caz de cuplaj) sau o alunecare variabilă, precum și posibilitatea de reglare a vitezei de rotație. Folosirea FEP (sau a cuplajelor) permite rezolvarea unei serii mari de probleme practice ca: realizarea unei acționări electrice rapide fără utilizarea unor mijloace de pornire reglabile; realizarea unei frînări sigure cu moment de frînare variabil; realizarea unor dispozitive de protecție ce exclud posibilitatea distrugerii elementelor de transmisie sau a mecanismelor componente; realizarea reglării momentului și a vitezei de rotație; antrenarea uniformă a unor utilaje cu regim de lucru variabil (pompe, ventilatoare, compresoare, transportoare de mare capacitate, etc.); pornirea lină și posibilitatea de reversare a mișcării unor mecanisme sau utilaje.

Principial /42/, realizarea FEP a avut la bază studiul proprietăților a două lamele metalice paralele conductoare care se află sub acțiunea unei tensiuni continue și sînt separate între ele printr-un dielectric de granulație fină de pulbere feromagnetică. Cele două lamele conductoare au fost introduse într-un câmp magnetic uniform.

Momentan, FEP se pot împărți în două mari categorii și anume: cu material de umplere lichid și cu material de umplere uscat, aceasta în funcție de natura dielectricului ce umple întrefierul.

Deocamdată, FEP la care umplutura se găsește în stare lichidă nu au dat rezultate practice satisfăcătoare, aceasta pe motivul că utilizarea suspensiei de pulbere feromagnetică în ulei mineral /62/ sau ulei silico-organic cu rolul de protejare a pulberii împotriva oxidării și aglomerării, în cazul funcționării îndelungate în regim de alunecare, duce la cocsificarea uleiului

---

\* În continuare vor fi notate prescurtat FEP

/43/ și modificarea proprietăților materialului de umplere.

Datorită acestui fapt, variantele actuale de FEP utilizează material de umplere uscat (fier-carbonil, fier pulverizat sau fier măcinat în mori turbionare). Acest tip de frână constituie obiectul studiului dezvoltat în prezenta lucrare.

FEP funcționează pe principiul creșterii inducției magnetice /42/ din întrefier (care este umplut cu pulbere feromagnetică) la creșterea curentului ce alimentează bobina de excitație.

Schematic, în figura 3 se reprezintă două plăci paralele

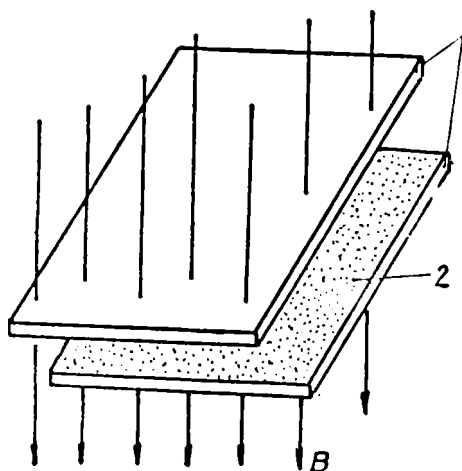


Fig. 3. Schema de principiu funcțional a FEP.

din oțel-1 între care se introduce umplutura feromagnetică-2. În cazul în care ansamblul descris se introduce într-un câmp magnetic uniform de inducție  $B$  orientat perpendicular pe suprafața celor două plăci, particulele de pulbere dintre acestea vor realiza o cuplare ce împiedică deplasarea plăcilor în direcția perpendiculară câmpului magnetic. În acest mod, s ratu e pulbere dintre cele două plăci realizează un mediu plastic a cărui rezistență la deplasare

depinde de valoarea inducției magnetice.

Având la bază principiul arătat, s-au realizat practic FEP, una din plăci fiind fixă (inductor sau stator), cealaltă fiind mobilă (indus sau rotor), iar pulberea feromagnetică ce umple spațiul dintre cele două elemente are marele avantaj de a mări permeabilitatea magnetică a acestuia de 4 - 8 ori, în funcție de compoziția materialului de umplere și valoarea realizată a inducției în întrefier.

În figura 4 se reprezintă schematic o frână cu pulbere. În cazul în care statorul-1 este fix, în lipsa curentului de excitație, frâna cu pulbere reprezintă practic o frână electromagnetică cu fricțiune normal deschisă, care este comandată prin

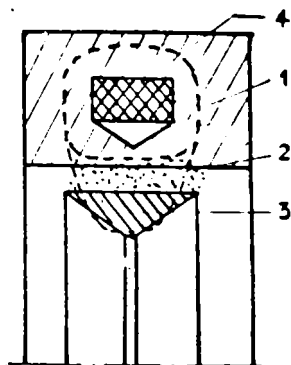


Fig. 4. Reprezentarea schematică a unei FEP.

bobina de excitație. La apariția și creșterea curentului de excitație, liniile de cîmp magnetic se vor închide prin rotor-intrefier-stator și va crește inducția magnetică în intrefierul-2 care este umplut cu pulbere. Acest fenomen duce la creșterea forței tangențiale ce tinde să rotească statorul, ceea ce va face să crească cuplul de frinare, reducîndu-se în acest timp viteza de rotație a rotorului-3.

Factorul principal ce condiționează cuplul de frinare al acestor tipuri de frine îl constituie efortul specific de deplasare, a cărui valoare depinde de inducția magnetică în intrefier, de mărimea intrefierului, de calitatea materialului de umplere, de compoziția amestecului, precum și de o serie de factori constructivi.

În cazul în care bobina de excitație nu este alimentată atunci materialul de umplere trebuie să-și păstreze mobilitatea și să se scurgă în cavități special amenajate în acest scop, fără a influența transmiterea mișcării de rotație.

Amestecul de umplere feromagnetic /34, 55, 64, 75/ este de obicei realizat din fier-carbonil sau fier pulverizat, sau din aliaj pulverizat din oțel cu nichel sau crom, amestecat cu oxizi de magneziu, sticlă fin dispersată, grafit coloidal, ș.a. Substanțele adăugate în pulbere sînt cunoscute sub numele de separatori și au rolul de a crea amestecuri ce nu se aglomerează și nu sînt supuse uzurii la funcționarea în cazul temperaturilor ridicate. Aglomerarea materialului de umplere feromagnetic are ca efect modificarea considerabilă a permeabilității magnetice a zonei de lucru, precum și a cuplului de frinare.

Datorită faptului că reluctanța circuitului magnetic și a intrefierului au valori însemnate, puterea de comandă necesară pentru excitarea FEP este redusă atîngînd 50 - 60% din puterea de comandă a frinelor electromagnetice de fricțiune cu mai multe discuri.

În raport cu celelalte tipuri de frine, FEP prezintă următoarele avantaje:

- construcție simplă;
- rapiditate foarte mare, deoarece practic rotorul nu-și schimbă poziția în raport cu circuitul magnetic, iar materialul de umplere feromagnetic este practic fără inerție, timpul necesar pătrunderii acestuia în cavitățile de lucru putînd fi considerat zero;

- lipsa uzurii părților de lucru în cazul funcționării îndelungate în regim de alunecare. Se supun uzurii numai materialele de umplere ce pot fi înlocuite ușor;
- menținerea constantă a cuplului de frinare pentru un domeniu larg a vitezei de rotație, ceea ce nu este posibil cu un alt tip de frână.
- creșterea aproape liniară a cuplului de frinare la creșterea curentului de excitație.

Dintre dezavantajele prezentate de aceste tipuri de frine menționăm:

- gabarite și greutatea mai mari decât la frinele electromagnetice cu discuri, dar, mai mici decât la frinele electromagnetice cu alunecare;
- necesită înlocuirea materialului de umplere feromagnetic după o anumită perioadă de funcționare;
- inexistența unor metode optime de proiectare, cercetarea lor presupunând experimentarea atentă, luând în considerare o serie de factori de natură constructivă și din punctul de vedere al materialului de umplere;
- stabilirea unor procese tehnologice adecvate și la costuri de producție reduse pentru realizarea pulberilor feromagnetice în țară, în scopul reducerii importurilor.

## C A P I T O L U L 1

### REALIZARI SI PARTICULARITATI CONSTRUCTIVE ALE FEP PE PLAN MONDIAL

Rezultatele obținute de un număr restrâns de cercetători și firme specializate din străinătate în domeniul FEP, precum și domeniul lor de utilizare, ne duce la concluzia că acestea se pot împărți în două mari categorii și anume: FEP de uz general și FEP pentru instalații de foraj.

#### 1.1. FEP de uz general

În această categorie vom încerca să încadrăm dispozitivele de frinare indicate de literatură care pot fi utilizate în următoarele scopuri industriale: standuri de probe și de rodaj, dispozitive de frinare pentru aparate de măsură de precizie ridicată, dispozitive de frinare utilizate în construcția roboților industriali (în special pentru cei de sudură), dispozitive de pornire pentru motoare electrice, ș.a.

Astfel, pentru frinarea rapidă a unor aparate, bazat pe construcția cuplajelor electromagnetice cu pulbere, firma vest-germană EMG realizează un dispozitiv de frinare rapid /85/, a cărui construcție se poate vedea din figura 5. Cuplul realizat de

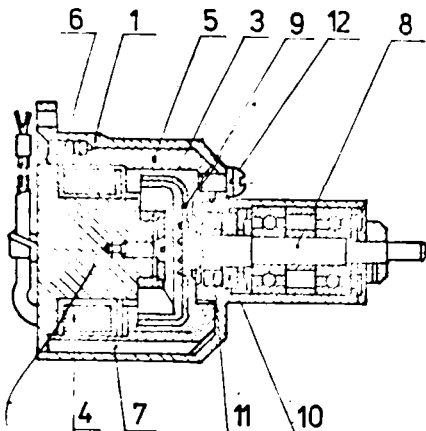


Fig.5. FEP pentru aparate de măsură.

aceste dispozitive este cuprins între 0,15 și 0,20 daN.m, la un timp de creștere al acestuia de 8 - 10 ns. Constructiv, în corpul-1, executat din duraluminu este presat circuitul magnetic -2, din oțel recopt, la care se înșurubează o piesă polară-3 din oțel de aceeași calitate. Circuitul magnetic-2 se fixează prin șuruburile-6 de partea exterioară a circuitului magnetic -5 care este prevăzut cu decupările radiale-7 în scopul reducerii valorii curenților tur-

*urale - i 2?*

bionari și mării rapidității frinei. În corpul-1 sînt montate două lagăre pe rulmenți în care se rotește arborele-8 de flanșă care se fixează un rotor cilindric subțire-9, executat din oțel cu conținut redus de carbon. În rotor sînt prevăzute orificii de scurgere a pulberii feromagnetice în întrefierurile de lucru și suplimentare. Pentru etangarea lagărelor împotriva pătrunderii pulberii a fost prevăzut un inel de pîslă-10, care se impregnează cu ulei silico-organic și un magnet inelar-11, din aliaj alnico. Cu toate că între magnetul inelar și arbore există o zonă neutră prin care ar putea pătrunde pulberea, etangarea combinată a dat rezultate satisfăcătoare. Pe circuitul magnetic -2 se fixează bobina de excitație-4, iar pulberea feromagnetică se introduce și înlocuiește prin gurubul-12.

Cercetările efectuate asupra frinelor și cuplajelor electromagnetice cu pulbere au urmărit varianta prin care poate fi evitată sinterizarea și compactizarea materialului de umplere în timpul funcționării sub influența trepidațiilor și vibrațiilor mecanice. Ca rezultat al acestor cercetări s-a ajuns la concluzia că dacă se adaugă materialului de umplere grafit sub formă de solzi, nu se obțin rezultate pozitive, deoarece solzii de grafit sînt comparabili ca mărime cu particulele de pulbere de fier și ei nu învaluișe fiecare particulă în parte în scopul evitării compactării și sinterizării pulberii /53/.

În cazul în care amestecul de umplere conține grafit coloidal în solvent rășinos, problema compactării este rezolvată cu succes, deoarece particulele de grafit coloidal, de dimensiuni mai mici decît ale pulberii feromagnetice, datorită existenței lichidului, se vor lipi de particulele de fier pe toată suprafața.

Folosind acest procedeu, firma americană Lear Inc. /33,76/ a realizat un cuplaj electromagnetic cu pulbere care poate fi utilizat ca dispozitiv de frînare, care este reprezentat schematic în figura 6.

Pe circuitul magnetic-1 se fixează o roată dințată din textolit-4 pe a cărei parte frontală se amplasează două inele de contact prin care se alimentează bobina de excitație-3. În cazul utilizării numai ca dispozitiv de frînare, cele două inele și roata dințată nu mai sînt necesare, circuitul magnetic fiind fix, rotindu-se numai rotorul-2, ceea ce duce la construcție mai simplă.

Materialul de umplere, care este preparat din pulbere de

fier amestecat cu grafit coloidal, se prezintă sub forma unei paste suficient de friabile în lipsa cimpului magnetic, devenind foarte friabilă în prezența acestuia. În aceste condiții, problema etanșării se rezolvă prin folosirea unei manșete (semering) de cauciuc silico-organic armată cu o buclă metalică.

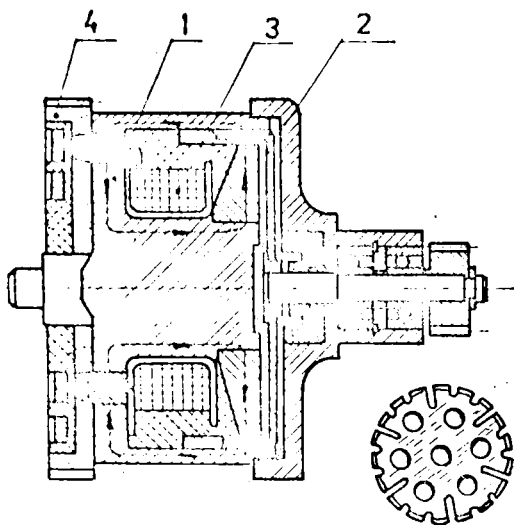


Fig.6. Cuplaj electromagnetic al firmei Lear Inc.

Rotorul este prevăzut cu gase decupări adânci și douăsprezece tăieturi de adâncime mai mică, iar pe partea frontală sînt executate gase orificii ce unesc cavitățile cu materialul de umplere.

Răcirea dispozitivului la funcționarea staționară

se realizează prin suflare de aer în orificiul central din arbore în cazul utilizării în rol de cuplaj, sau prin canale în stator în caz de frînă. Inсуflarea de aer prin interior este un procedeu foarte eficient, deoarece favorizează și răcirea suprafeței exterioare, dar are dezavantajul unei construcții mai complicate.

În /54/ se indică o serie de cuplaje electromagnetice cu pulbere cu contacte destinate unor condiții grele de pornire, pentru diverse utilaje. În ipoteza că partea exterioară a cuplajului ar fi fixată, aceste tipuri de cuplaje se pot utiliza și în regim de frînă cu funcționare periodică la intervale mari de timp, deoarece nu sînt prevăzute cu un sistem suplimentar de răcire.

Realizarea constructivă a acestor tipuri de cuplaje se poate urmări după figura 7, unde: 1-stator; 2-rotor; 3-bobină de excitație; 4-capcane magnetice; 5-lagăre; 6-inele de contact; 7-sistem de etanșare. Valoarea cuplului transmis de aceste tipuri de cuplaje este cuprinsă între 10 și 1250 daN.m.

Pe suprafețele frontale ale rotorului se realizează capcanele magnetice-4 care sînt confecționate din niște discuri ac-

șite fixate de obicei prin șuruburi, executate de obicei din oțel

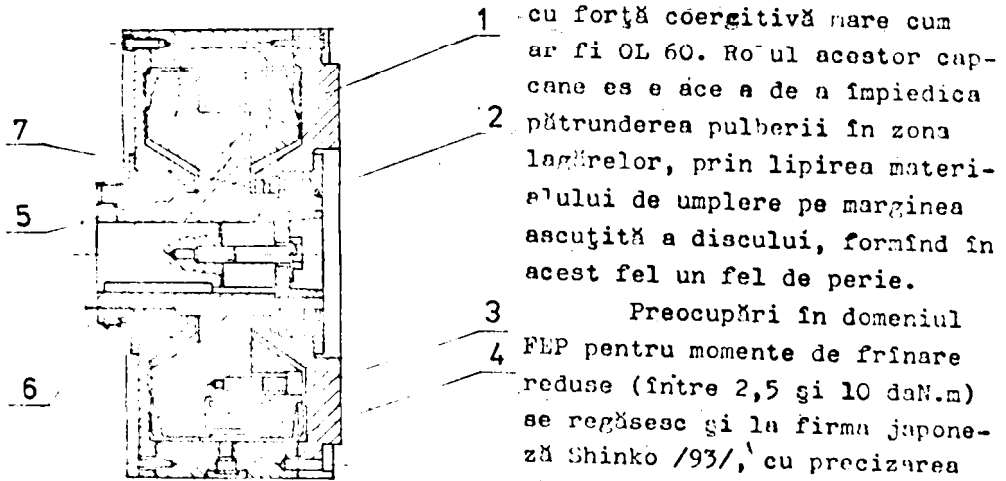


Fig. 7. Secțiune printr-un cuplaj electromagnet cu pulbere pentru porniri grele.

cu forță coergitivă mare cum ar fi OL 60. Roțul acestor capcane este acea de a împiedica pătrunderea pulberii în zona lagărelor, prin lipirea materialului de umplere pe marginea ascuțită a discului, formând în acest fel un fel de perie.

Preocupări în domeniul FEP pentru momente de frinare reduse (între 2,5 și 10 daN.m) se regăsesc și la firma japoneză Shinko /93/, cu precizarea că în documentația studiată nu se dau nici-un fel de indicații constructive.

Firma vest-germană Lenz /90/ execută frine pentru mo-

mente reduse, realizate constructiv ca în figura 8, statorul-l executându-se din două bucăți asamblate prin prezoane. În interiorul acestuia se introduce bobina de excitație-2 prevăzută cu carcasă și inelul diamagnetic-3 pentru reducerea curenților turbionari. Rotorul-4 se execută sub formă masivă, prevăzut cu șanțuri concentrice, cel din centru fiind mai mare și este sprijinit pe lagărele cu rulmenți-7 prin intermediul portlagărelor-5 și inelelor de siguranță-6. În scuturile portlagăr sînt prevăzute caviități speciale pentru scurgerea pulberii feromagnetice; etangarea rulmenților se face cu inelele de pistol-8. Răcirea frinelor menționate se realizează natural, prin montarea de radiatoare suplimentare, iar principalele caracteristici ale acestora sînt indicate în tabelul 1, unde s-au utilizat notațiile:

- $M_n$  -cuplul nominal;
- $P$  -puterea de excitație;
- $U$  -tensiunea nominală de alimentare;
- $I_e$  -curentul de excitație la 20°C;
- $t_1$  -timpul tranzitoriu pînă cuplul ajunge la 0,9  $M_n$ ;
- $t_2$  -timpul tranzitoriu din momentul decuplării pînă ce cuplul ajunge de la  $M_n$  la 0,1  $M_n$  în curent continuu;
- $P_v$  -puterea de vîrf (\*-frina este echipată cu radiator);



- $J_R$  -momentul de inerție al rotorului;
- $m$  - masa dispozitivului.

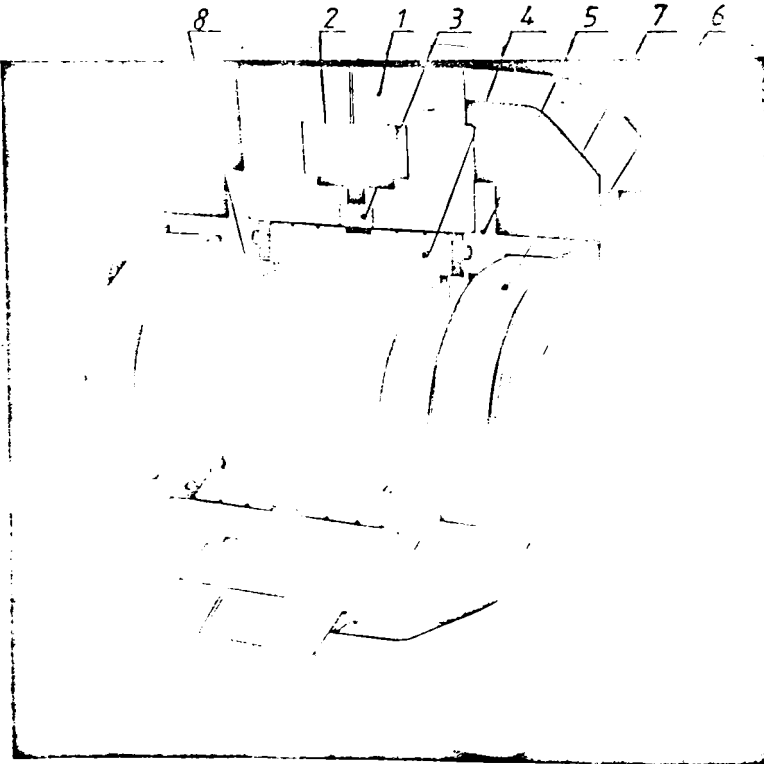


Fig.8. Vedere secționată a unei FEP tip Lenze.

**TABELUL 1:** Caracteristicile principale ale FEP executate de firma Lenze.

Tip	$M_n$ N.m	P W	U V	$I_e$ A	$t_1/t_2$ ms	$P_v$ W	$J_r$ Kg.m <sup>2</sup> .10 <sup>-3</sup>	$m$ kg
01	10	9	24	0,37	280/70	* 25 85	0,18	2,2 3,3
02	20	11	24	0,45	540/170	* 40 120	0,52	4,0 5,5
04	40	14	24	0,58	840/270	* 80 220	1,7	7,8 10,5
08	80	12	24	0,50	1600/500	* 100 280	5,3	15,2 20,0
16	160	25	24	1,03	1200/570	* 130 400	17,0	28,8 33,4
32	320	27	24	1,1	3000/930	* 210 630	68,0	47,0 150,0

Dintre proprietățile caracteristice ale frinelor amintite

se pot menționa următoarele:

- cuplul de frinare crește aproape liniar în raport cu creșterea curentului de excitație;
- reglarea cuplului se face simplu, prin modificarea curentului de excitație;
- cuplul de frinare este independent de viteza de rotație;
- se poate realiza o creștere progresivă și lină a cuplului de frinare, reglarea făcându-se fără zgomote.

Asupra materialului de umplere, firma nu dă nici-un fel de indicații, dar sînt redată unele din domeniile de aplicare posibile ale acestor dispozitive. Astfel, în figura 9, FEP are rolul de a menține constantă viteza de derulare a hîrtiei pentru o

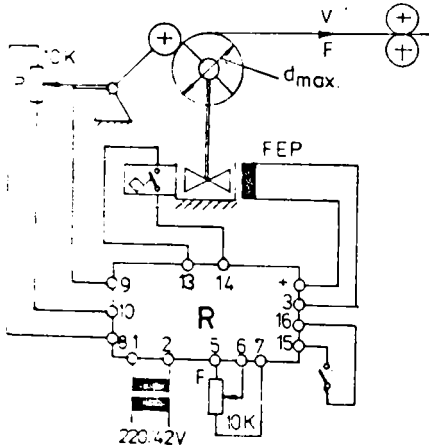


Fig.9. Menținerea constantă a vitezei de derulare a hîrtiei.

imprimantă. Pentru realizarea acestui scop, frîna se leagă cu tamburul pe care este înfășurată hîrtia de imprimare și, cu ajutorul unui regulator electronic tip 422, indicat de firmă, prin intermediul unui palpator ce urmărește diametrul tamburului cu hîrtie și transmite semnalul unui potențiomtru P se modifică valoarea curentului de excitație al frinei în așa fel încît efortul de tracțiune dezvoltat rămîne constant pe tot timpul derulării tamburului.

Pentru ca frîna să nu se supraîncălzească, regulatorul are încorporat un dispozitiv de sesizare și protecție la atingerea limitei de temperatură.

Firma franceză Jaeger, o firmă specializată în organe de transmisie, execută atît cuplaje cît și FEP. De asemenea, pentru diverse scopuri industriale /89/, firma execută limitatoare de cuplu cu pulbere, indicînd și cîteva aplicații posibile ale acestora.

Limitatoarele de cuplu cu pulbere constituie organe de protecție în transmisii, cuplul transmis nedepășind niciodată valoarea impusă. Cuplul transmis este reglabil, sensul de rotație este indiferent, iar după efectuarea operației de limitare nu e necesar să se facă rearmarea dispozitivului. În figura 10 s-a reprezentat în mod simplificat, un asemenea limitator de cuplu.

Funcționarea limitatoarelor de cuplu se bazează pe proprietățile magnetice ale fierului moale. Bobina inductoare-4 este amplasată pe un magnet permanent-2, iar pulberea feromagnetică supusă cîmpului leagă rotorul-5 de masa polară externă (statorul-1). O spiră "shunt" reabilă-3, face să varieze fluxul magnetic în pulbere ceea ce duce la modificarea cuplului. Cuplul transmis este minim și

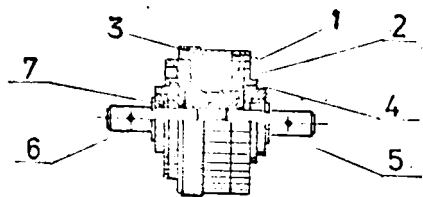


Fig.10. Secțiune printr-un limitator de cuplu.

spira "shunt" este reciprocă cu statorul, pe figură aflându-se în partea dreaptă. Această spiră "shunt" se execută sub forma unei piulițe ce se înșurubează peste stator. Plașa de reglaj a limitatoarelor prezentate este în raportul de 1:3, iar pentru un reglaj dat, cuplul este constant. Acest cuplu este independent de viteza de rotație și alunecare, iar puterea disipată este proporțională cu masa dispozitivului.

Limitatoarele de cuplu executate de firma amintită se execută în funcție de cuplul transmis, în N.m., în următoarele variante: 0,005 - 0,015; 0,02 - 0,06; 0,05 - 0,15; 0,12 - 0,36; 0,3 - 0,1; 0,6 - 2; 2 - 6; 4 - 12; 5 - 15; 15 - 40; 25 - 65; 30 - 85.

Limitatoarele de cuplu rezolvă o serie de probleme din domeniul transmisiilor, cum ar fi: frinarea permanentă la cuplu constant; limitarea cuplului transmis; protecția și securitatea organelor de transmisie; poziționarea și indexarea; simularea unor sarcini, ș.a.

Dintre multiplele posibilități de utilizare, în figura 11

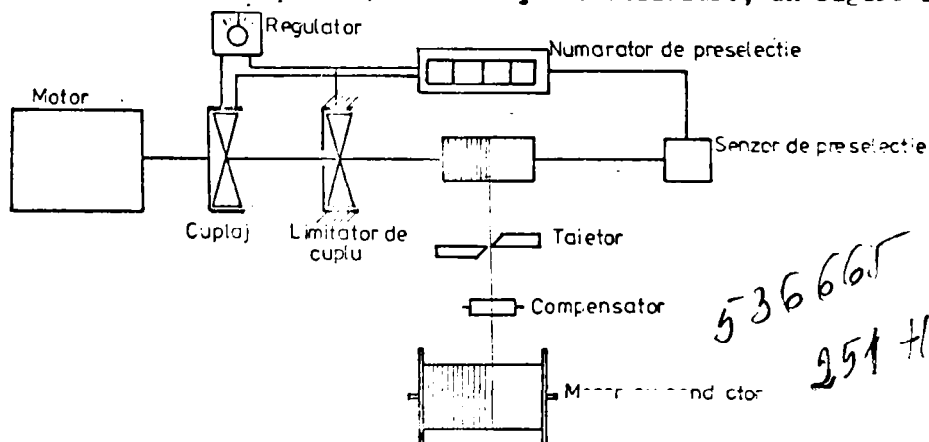


Fig.11. Instalație automată pentru fabricarea rezistențelor bobinate dotată cu limitator de cuplu.

se prezintă schema de principiu a unei instalații automate de fabricat rezistențe bobinate, cu o productivitate de 900 buc./oră, ce utilizează un limitator de cuplu.

Principial, instalația funcționează astfel: motorul electric de acționare se rotește continuu, numărul de rotații al suportului pe care se bobinează rezistența fiind controlat și urmărit prin senzorul și numărătorul de preselecție, care, prin regulator controlează excitația cuplajului. Când cuplajul este excitat, instalația lucrează și firele rezistive sînt trase de pe motor înfășurându-se pe suportul rezistenței spre dreapta. La sfîrșitul operației (număr de spire impuse), numărătorul de preselecție, prin regulator, intrerupe alimentarea cuplajului și excită limitatorul de cuplu care are rol de frînă. La reluarea operației, cuplajul va din nou excitat, iar limitatorul de cuplu dezexcitat.

FEF executate de firma Jaeger se construiesc pentru cupluri de frinare între 0,2 - 2000 N.m., în varianta D (cu lagăre cu rulmenți) și între 200 - 2000 N.m., în varianta G (cu lagăre cu bușe). Frinele pot să fie cu răcire liberă sau cu radiatoare suplimentare, executîndu-se la comandă specială și frine răcite cu apă, pentru condiții grele de funcționare.

Pentru cupluri de frinare reduse, frinele se execută cu rotor masiv și statorul din 2 - 3 bucăți asamblate prin prezoane. Pe partea exterioară a statorului se poate monta un radiator din aluminiu prevăzut cu decupări.

Pentru cupluri de frinare mai mari de 100 N.m, rotorul, precum și cavitatea interioară a statorului sînt prevăzute cu decupări speciale pentru scurgerea pulberii feromagnetice.

Schematic, în figura 12 se reprezintă o secțiune prin frina tip FT 1200 cu cuplu nominal de 120 N.m, în varianta D (lagăre cu rulmenți), iar în figura 13 o secțiune prin frina tip FT 2005, varianta G (lagăre cu bușe) cu cuplu nominal de 200 N.m., unde s-a notat: 1-stator; 2-portlagăr; 3-bobină de excitație; 4- rotor; 5-lagăr; 6-sistem de etanșare; 7-radiator; 8-flanșă de cuplare (se excută numai la cerere); 9-cutie de borne. Din ambele figuri se pot observa formele speciale ale rotorului (tip roată dințată), care este prevăzut cu canale periferice și aripioare pentru dirijarea pulberii. De asemenea, portlagărul are o formă specială, în vederea înlăturării fenomenului de compactizare și a deteriorare a pulberii feromagnetice și pătrunderii acesteia în

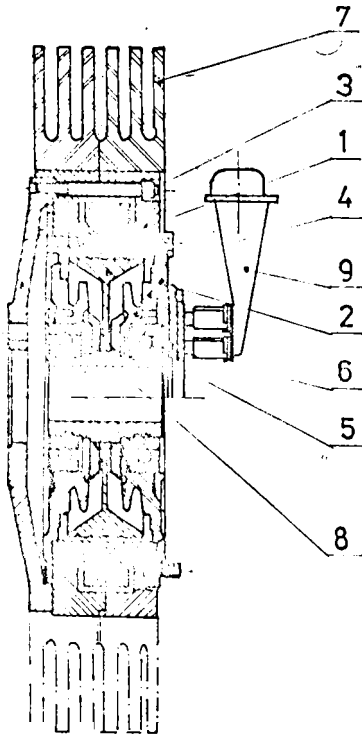


Fig.12. Secțiune prin FEP tip FT 1200

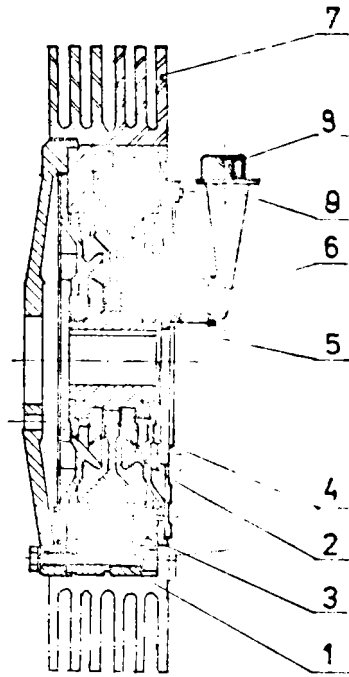


Fig.13. Secțiune prin FEP tip FT 2005.

Una din aplicațiile posibile ale frinelor executate de firma Jäger este redată în figura 14, unde frâna face parte dintr-

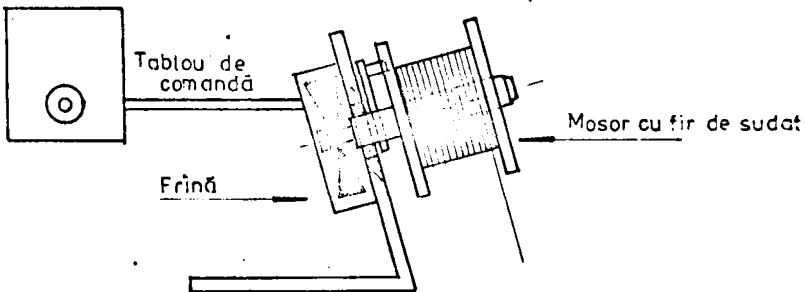


Fig.14. Dispozitiv automat de sudat continuu

un dispozitiv automat de sudat continuu. Frâna și mosorul pe care este înfășurat electrodul de sudură fac ansamblu comun, mosorul fiind montat pe axul rotorului frânei printr-un sistem de rigidizare. Dacă frâna este excitată, cuplul de frînare va fi dependent numai de curentul de excitație.

Tensiunea mecanică în electrod este aproape constantă, fiind corectată în raport cu diametrul tamburului de derulare a electrodului de sudură.

Sistemul automat este prevăzut cu dispozitive de protecție, iar în cazul în care din anumite motive electrodul se rupe, frâna va fi dezexcitată.

Firma austriacă Vibro-Meter /97/ execută FEP al căror moment de frinare este cuprins între 0,6 - 6000 N.m., și a căror putere disipată de lungă durată variază între 20 W și 120 kW.

Fiind o firmă specializată în dispozitive de frinare, execută următoarele trei tipuri de frâne: frâne cu curenți turbionari (Foucault); FEP denumite de firmă frâne magnetice; frâne combinate, adică și cu curenți turbionari și magnetice.

Pentru a ne putea da seama de caracteristicile funcționale ale acestor tipuri de frâne, vom încerca să facem o comparație între ele.

Astfel, la frânele cu curenți turbionari, caracteristica mecanică (cuplu în raport cu viteza de rotație) arată ca în figura 15. Se poate observa că momentul de frinare crește progresiv

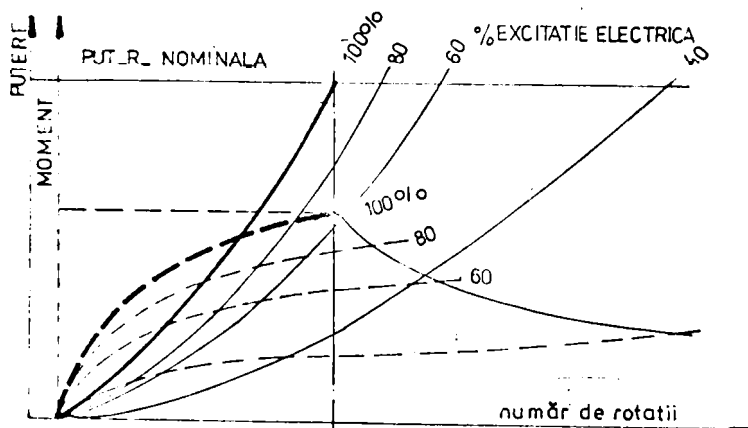


Fig.15. Caracteristica mecanică la frânele cu curenți turbionari.

cu viteza de rotație în raport cu gradul de excitație electrică (100% corespunde saturației magnetice). Puterea și momentul nominal sînt atinse la excitație 100% și la viteza de rotație  $n_g$ , iar valoarea acestor parametrii nu poate fi depășită decît pentru o scurtă perioadă de timp, bine determinată. Viteza maximă de lucru depinde de tipul (gabaritul) frinei și limitează domeniul posibil al puterii sale în raport cu cuplul. După cum se observă,

caracteristica cuplului și puterii este crescătoare cu viteza și, semnificativ pentru aceste tipuri de frâne, e faptul că dacă viteza scade va scădea și cuplul, în final devenind nul.

Pentru cazul frinelor magnetice caracteristica mecanică este redată în figura 16 și scoate în evidență că atunci când a-

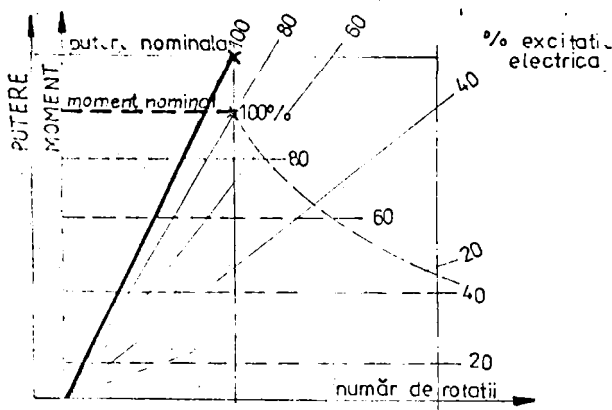


Fig.16. Caracteristica mecanică a frinelor "magnetice".

ceste frâne sînt excitate electric, cuplul lor de frinare este independent de viteza de rotație, existînd cuplu chiar și la viteză nulă. Controlul cuplului de frinare se face și aici prin gradul excitației electrice (100% corespunde saturației magnetice). Din caracteris-

tica puterii se poate observa că aceasta crește liniar cu viteza de rotație.

Comparativ cu frînele cu curenți turbionari, viteza maximă în stare neexcitată este aproape identică dar, în cazul în care frîna "magnetică" se va excita, viteza maximă a acesteia este de aproape trei ori mai mică, cuplul de frinare maxim fiind de trei ori mai mare. De aceea, aceste frîne se recomandă în aplicațiile unde se cere un cuplu constant, la viteze reduse.

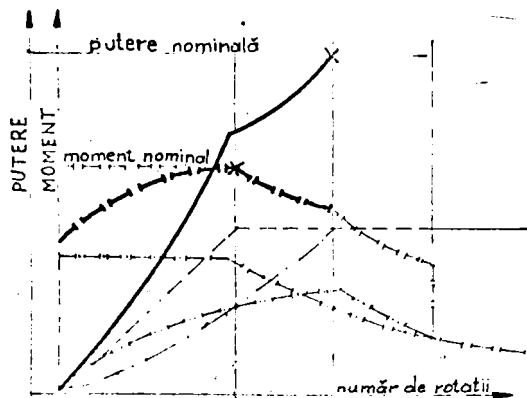
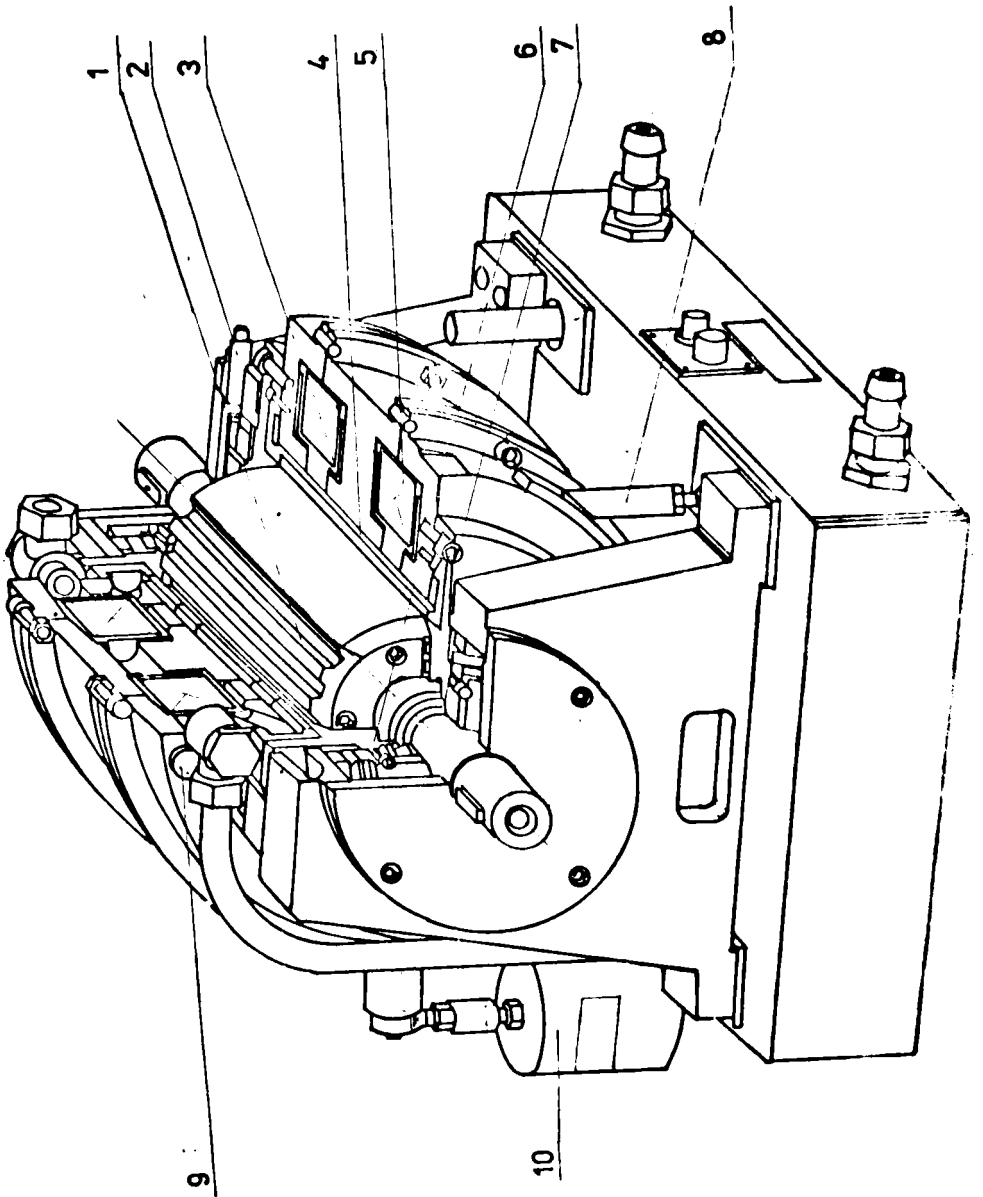


Fig.17. Caracteristica mecanică a frinei combinate.

Frînele combinate îmbină avantajele celor două tipuri de frîne și prezintă o caracteristică mecanică îmbunătățită, ca cea indicată în figura 17. Se observă că, datorită eficienței maxime a frinelor magnetice (valoarea staționară a cuplului este de cel puțin trei ori mai mare), din suprapunerea celor două caracteristici e posi-





tulă frînarea atât la viteze de rotație mari cât și la viteze reduse. Constructiv, frînele combinate au un gabarit mai mare decît fiecare frînă luată separat. Ele se pot realiza cu excitație independentă și, în raport cu necesitățile impuse, dau posibilitatea de variere în diverse combinații, adîptînd puterea și momentul de frînare.

Realizarea constructivă a FEP executate de firma Vibro-Meter se poate vedea din figura 18 unde: 1-rotor; 2-traductor de

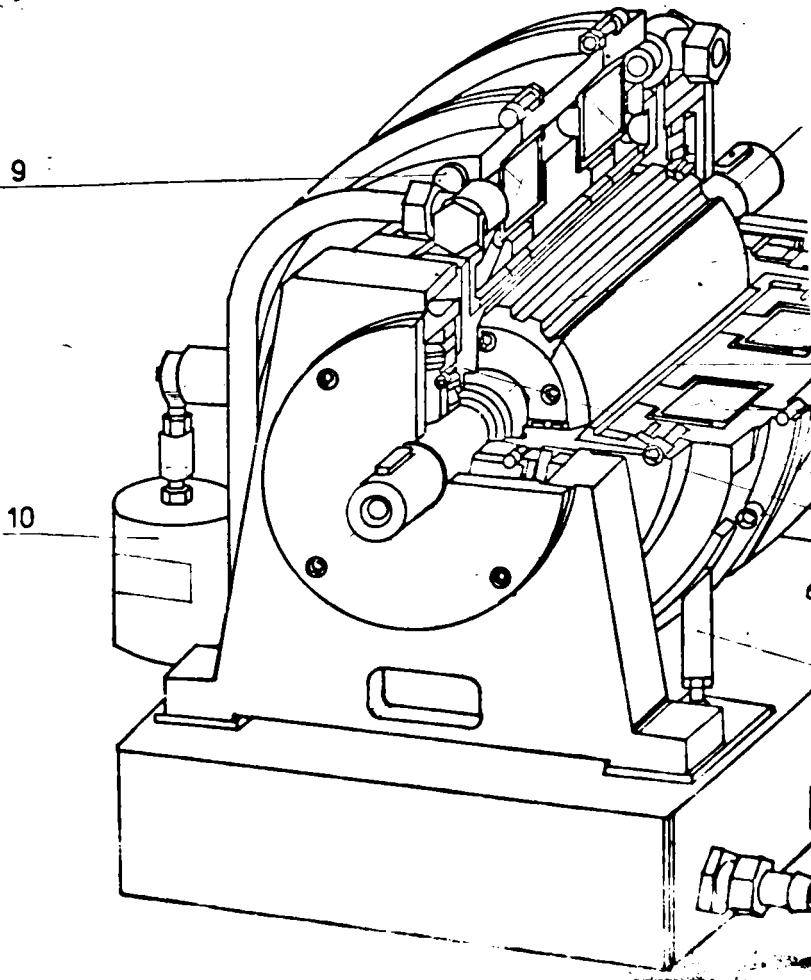


Fig.18. Vedere secționată prin FEP tip Vibro-Meter.

viteză; 3-stator; 4-canale de răcire; 5-bobină de excitație; 6-potenți oscilanți; 7-labirinți etanșare; 8- protecție la supra-sarcină; 9-termostat; 10-traductor de cuplu.

Din figură se poate observa că statorul-3 este executat din trei repere și prevăzut cu canalele-4 pentru circulația apei de răcire. Rotorul-1 se execută în construcție masivă, prevăzut cu ganțuri longitudinale trapezoidale pentru reducerea curenților turbionari și pentru dirijarea pulberii feromagnetice. Pantangarea rulmenților-6 împotriva pătrunderii pulberii feromagnetice se realizează cu labirinți și garnituri de pișă-7.

Pentru funcționarea frinelor în standurile de probe, firma dotează frânele cu tot echipamentul necesar, echipament ce se poate vedea în schema de principiu din figura 19: 1-sursă excitație; 2-dispozitiv pentru controlul liniarității și comenzi; 3-indicator de cuplu; 4- indicator de viteză de rotație.

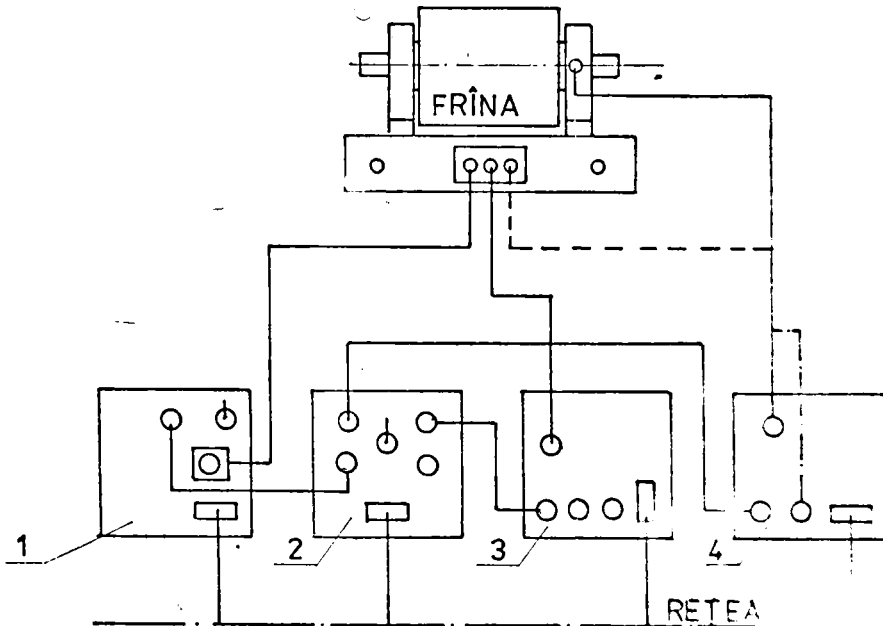


Fig.19. Stand de probe cu FEP tip Vibro-Meter.

Caracteristicile funcționale ale tipurilor de FEP executate de această firmă sînt indicate în tabelul 2, cu mențiunea că greutatea (masa) au fost reținute pentru varianta "STANDARD", iar cu "k" s-a notat varianta combinată. Pentru frânele de gabarit 1 PB 25, 2 PB 25 și 4 PB 25, în figura 20 s-au reprezentat caracteristicile lor mecanice.

Cu mențiunea că în /94/ sînt indicate toate variantele de montaj posibile, iar în legătură cu materialul de umplere firma indică doar tipul (de ex.: Nr. 410 L), a cărui compoziție este

TABLEUL 2: Caracteristicile funcționale ale FLP executate de firma VIBRO-MOTOR.

Tip frână	M <sub>n</sub> N.m.	Putere nominală kW			rot/min	Exc. Neexc.	M <sub>R</sub> %M <sub>n</sub>	Excitație		Cons. Masa apă
		LD	SD	rot/min				I A	U V	
1 PB 2,7	0,6	0,02	0,04	650	3000	20000	3%	0,5	17	Aer 1,35
2 PB 2,7	1,2	0,04	0,08				2%	1		2,2
4 PB 2,7	2,4	0,08	0,16				2%	2		3,65
1 PB 2,7k	0,6	0,15	0,3	4880	10000	20000	3%	0,5	17	max. 2,8
2 PB 2,7k	1,2	0,3	0,6				2%	1		21/ 3,65
4 PB 2,7k	2,4	0,6	1,2				2%	2		ora 5,1
1 PE 5,6	10	0,75	1,5	1460	2000	1000	2%	3	24	15,5
2 PE 5,6	20	1,5	3				2%	3,5		26,5
1 PE10	30	0,9	2,5	815	1500	5000	2%	3	24	cca 17
2 PE 10	60	1,8	5					5,5		24
4 PE 10	120	3,6	10					10		301/ 45
1 PE 15	300	12	35	1140	2000	4000	2%	4	45	kWh 113
2 PE 15	600	24	70					7,5		ptr. 210
4 PE 15	1200	48	140					12		t= 425
1 PE 25	1500	30	90	585	1500	2000	2%	3	45	30°C 460
2 PE 25	3000	60	180					6		930
4 PE 25	6000	120	360					12		1180

Notații: LD - lungă durată; SD - scurtă durată; M<sub>R</sub> - moment rezidual.

prezentată în capitolele următoare, precizăm că la întreprinderile: I.M.M.U.M Baia Mare, Unio Satu Mare și Neptun Ciampina există astfel de frâne în dotare, utilizate în gândurile de probe pentru încercarea reductoarelor normale, reductoarelor și motoreductoarelor planetare, reductoarelor cu sateliți dubli, motorvariatoarelor cu curele, troliilor minicro ș.a.

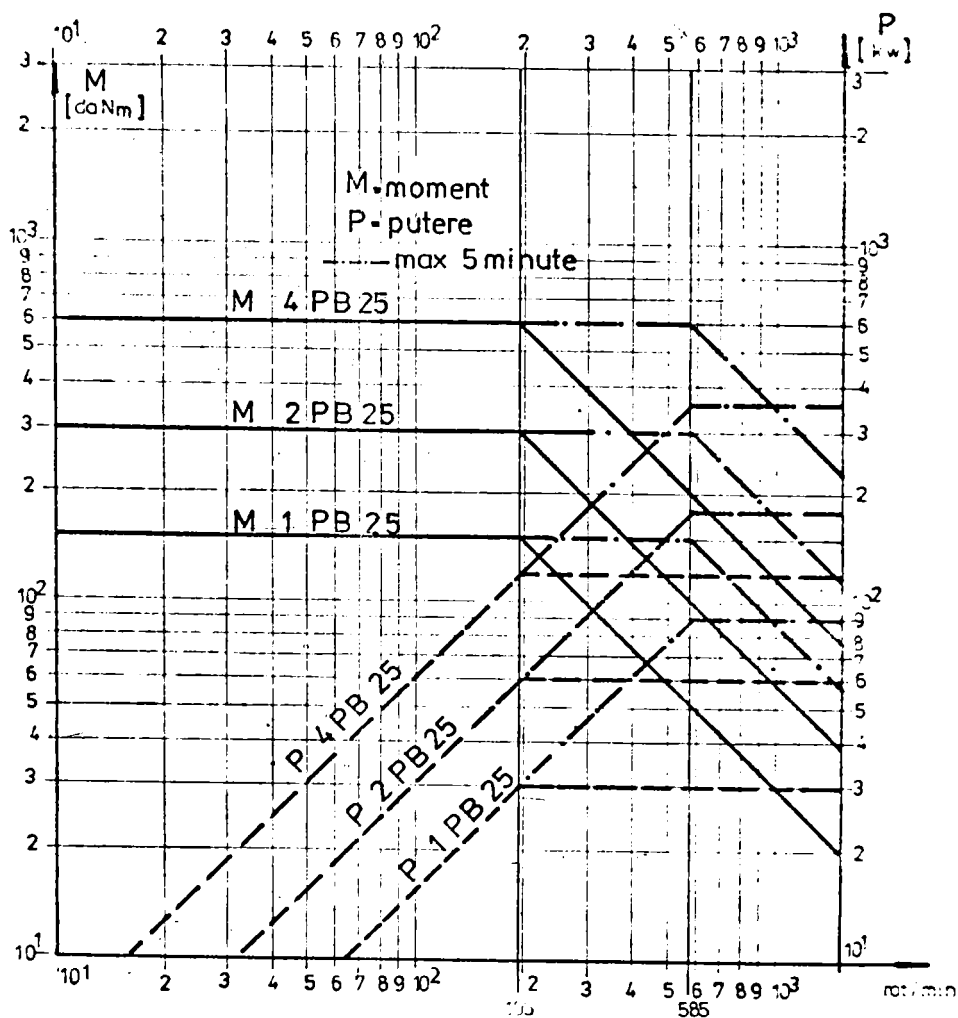


Fig. 20. Caracteristicile mecanice ale FEP executate de firma Vibro-Meter de tipul 1 PB 25, 2 PB 25 și 4 PB 25.

De asemenea menționăm că aceste tipuri de frâne (cele prevăzute cu sistem de răcire cu apă) au singurul inconvenient că, după un anumit timp de funcționare la încercările de durabilitate.

(cu referire la frina tip 4 PB 25 de 600 daN.m de la I.M.H.U.M. Italia Mare), inelele de cauciuc ce realizează etangarea la apă între elementii statorului au cedat, apa pătrunzînd la bobinele de excitație.

### 1.2. EEP pentru instalații de foraj

Troliile instalațiilor de foraj moderne cu capacități de ridicare mari (de la 50 la 300 tone) se dotează, în afară de frinele cu bandă obligatorii, cu dispozitive de frinare suplimentare /43/, a căror destinație este aceea de a absorbi și disipa energia ce se degajă la coborîrea coloanei de țevi de foraj în gaura de sondă, după schimbarea sapei de forare, la mari adîncimi.

Deoarece coloana de țevi de forare constă din segmente separate, regimul de lucru al frinelor suplimentare este un regim repetat, de scurtă durată. După coborîrea coloanei cu un tronson îngurubat urmează o pauză în timpul căreia se îngurubează tronsonul următor, tronson care în funcție de tipul instalației, are lungimea între 12 și 36 m.

Greutatea sarcinii ce se coboară crește pe măsura adăugării de tronsoane în progresie aritmetică, atîngînd valoarea maximă atunci cînd se face uz de toată coloana. În acest fel, energia absorbită de către frina suplimentară cu fiecare perioadă de lucru crește în salturi. Tahograma coborîrii în timpul unei perioade de lucru este de obicei apropiată de un trapez, adică constă dintr-o porțiune de demarare (după eliberarea frinei de bază cu bandă), o porțiune de mișcare stabilizată și o porțiune de încetinire. Cînd sarcinile sînt reduse, această tahogramă se apropie de forma unui triunghi.

Vitezele maxime de coborîre, din motive constructive și tehnologice, de regulă sînt limitate și nu depășesc 3 m/s. La sfîrșitul coborîrii coloanei de țevi, această viteză este substanțial redusă. Durata pauzelor este în general constantă și funcție de gradul de mecanizare al instalațiilor variază între 40 și 100 secunde.

În acest fel, dispozitivul de frinare suplimentar trebuie să posede proprietatea de a disipa puteri importante, care ajung în unele perioade de lucru, la instalațiile de foraj de tip greu, la cîteva mii de kilowați, iar momentul lor de frinare trebuie să fie reglabil rapid și în limite foarte largi.

Pentru a fi capabile să realizeze acest deziderat, s-au

folosit ca dispozitive de frinare suplimentare frinele hidrodinamice răcite-cu apă în circuit închis, frine care nu au făcut față cerințelor impuse. Simple din punct de vedere constructiv, cu un moment de frinare ridicat și un gabarit redus, aceste frine se montau lângă tamburul troliului, fără transmisii intermediare. Marele lor inconvenient constă în posibilitatea redusă de reglare, fiind necesare mufe suplimentare de strângere de mare putere sau dispozitive operative de decuplare pentru evitarea unor pierderi importante de putere la rotirea în sens invers (în timpul ridicării cîrligului neîntrerupt pentru tronsonul următor), precum și imposibilitatea utilizării eficiente pe porțiunile de frinare și la coborîrea țevilor cu viteze reduse.

Utilizarea motoarelor principale (în general motoare sincrone) de ridicare în regimuri de frinare este posibilă numai la instalațiile cu acționare electrică și aceasta în cazuri rare (în raport de tipul și puterea motoarelor, construcția și parametrii transmisiilor intermediare, etc.).

Actual, frinele suplimentare amintite au fost înlocuite în majoritatea instalațiilor de foraj cu FEP care au o construcție simplă, gabarit și greutate reduse, putere neînsemnată pentru comandă, moment de frinare independent de viteza de rotație în domeniul de lucru, permițînd și automatizarea completă a procesului de forare.

Cercetări în domeniul FEP pentru instalații de foraj au fost făcute /42, 43/ și de "Institutul de cercetări petroliere" Ghiprofteaș, din Moscova.

Pentru seria de frine cercetate s-a ales constructiv tipul cu circuit magnetic dublu, cu rotor cilindric sub formă de roată dințată (obadă) și două înfășurări de excitație, varianta ce asigură cele mai mici dimensiuni radiale și permite obținerea unei suprafețe mari de frinare la un moment de inerție mic al rotorului.

În cercetările efectuate s-a ținut cont ca dispozitivele proiectate și experimentate să facă față următoarelor cerințe:

- temperatura de lucru a amestecului pulverulent în condiții de exploatare să nu depășească valoarea de 300 - 350°C;
- amestecul pulverulent să fie bine izolat față de mediul exterior și apa de răcire;
- lagărele cu rulmenți să fie bine protejate contra pătrunderii particulelor abrazive de pulbere, la rotirea rotorului în lipsa curentului de excitație;

- caracteristica mecanică să prezinte o mare stabilitate și să fie ușor reglabilă în timpul perioadei de lucru;
- amestecul de umplere să poată fi înlocuit rapid și ușor la uzura acestuia;
- puterea de comandă să fie minimă;
- încălzirea bobinei de excitație să fie redusă.

Din considerente expuse anterior, pentru instalațiile de foraj s-au cercetat și experimentat FEP cu material de umplere uscat.

Trebuie menționat faptul că, frânele obișnuite cu fricțiune sau cele cu curenți turbionari, lucrează sigur și stabil numai la viteze mici și mijlocii de alunecare (sub 8 - 10 m/s). La viteze mari de alunecare se produce o uzură rapidă a suprafețelor de frecare și o modificare bruscă a momentului de frinare. În FEP, alunecarea la viteze de 20 - 25 m/s /43/, în cazul în care se aleg corect dimensiunile constructive și întrefierul de lucru este constant, nu este critică.

Pentru răcirea frinelor studiate se poate utiliza fie o răcire exterioară cu lichid circulant pe suprafețele exterioare, fie o răcire interioară prin circulația lichidului de răcire prin canale situate în apropierea întrefierului, în zona de degajare intensă a căldurii. Deoarece la ultima variantă transmiterea căldurii este mai eficientă, cu toate că duce la o construcție mai complicată, s-a adoptat acest sistem.

Constructiv /42, 43, 47, 48/, FEP cercetate de institutul menționat arată ca în figura 21, de unde se observă că frâna constă din doi electromagneți de curent continuu, immobili și așezați simetric (bobina-1 și statorul-2) de formă inelară și un rotor-3 în construcție sudată, care are forma unui volan, fixat cu pene pe ax și care se rotește în cavitățile inelare ale statorului. Mărimea cavităților inelare, adică a întrefierului se stabilește în funcție de gabaritul frânei între 2,5 - 3,0 mm. Introducerea materialului de umplere (constituit din pulbere de fier-carbonil F3 cu diametrul mediu de 8 microni după norma sovietică STU-MHP 1024/56, amestecat cu oxid de siliciu în raportul 40:1) se face prin orificiul-5 din inelul diamagnetic-4. Volumul materialului de umplere în întrefier se stabilește experimental în raport cu cuplul de frinare maxim la un curent de excitație constant.

Suprafețele de lucru ale rotorului /48/ sînt prevăzute cu șururi inelare cu secțiune dreptunghiulară și orificii (ferestre) străpuse în formă de fantă, care servesc pentru repartizarea mai

uniformă a amestecului de umplere în întregul de lucru. De asemenea, aceste ferestre au rolul de a menține o anumită cantitate

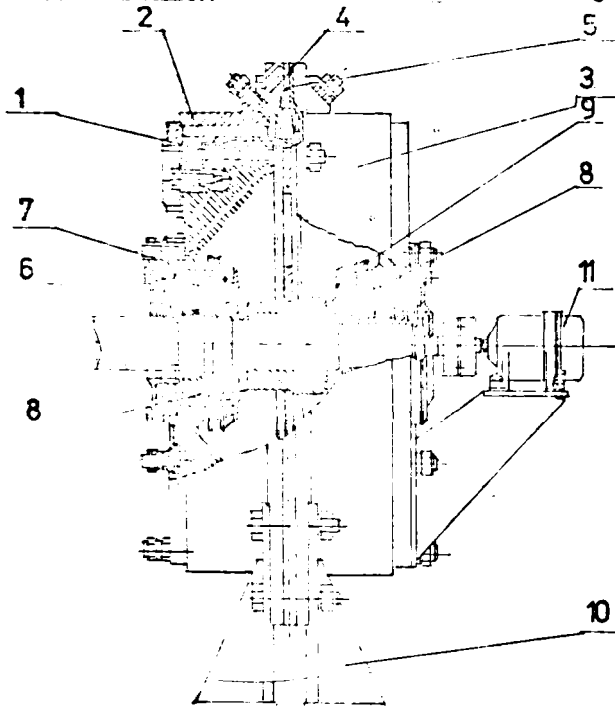


Fig.21. Secțiune prin FEP pentru instalații de foraj

de amestec (pe baza magnetismului remanent) în cazurile de decuplare a curentului în înfășurarea de excitație.

Protecția amestecului de umplere contra lubrifiamentului din lagăre se realizează cu ajutorul unor manșete (semeringuri) duble cu arcuri brățară-6 presate în orificiile lagărelor și cu orificii de drenare după manșete. Protecția fiecărui lagăr în parte contra pătrunderii în el a amestecului de

umplere din cavitatea interioară a frinei se face combinat și constă dintr-o cameră de respingere-7, o izolație magnetică-8 și un labirint de capăt-9. Izolația magnetică se creează cu ajutorul unui câmp magnetic între magnetul inelar inobil și discul camerei de respingere. Pulberea care pătrunde în acest spațiu este atraasă către capătul magnetului și formează o barieră sigură sub forma unei perii.

Realizarea etanșării sub forma magneților inelari pune probleme deosebite, deoarece executarea unor magneți permanenți inelari cu diametrul exterior care să depășească cu mult grosimea și înălțimea inelului (de peste 10 ori) cu axe magnetice și geometrice coincidente, din aliaje magnetice cunoscute, este aproape imposibilă /45/. Din această cauză, magneții inelari de forma necesară au fost confecționați (conform tehnologiei metaloplastice VNIIEK /5/) din pulbere de ferită de bariu amestecată cu rășină polimerizabilă. La realizarea magneților, pentru evitarea unor forme de presare precizie și prese puternice, inelele s-au confecționat pe sectoare iar, înainte de magnetizare se asamble-



ză în carcasa.

Utilizarea diverselor tipuri de sisteme de etanșare cu labirint, la realizarea FEP, este indicată în /18, 29/ făcându-se adaptările necesare.

Sistemul de răcire al frinelor cercetate și studiate este un sistem în circuit închis, cu refulare forțată a apei prin frână cu ajutorul unei pompe de recirculație și răcirea acesteia într-un radiator răcit la rândul său de un ventilator electric.

După cum s-a constatat, stabilitatea caracteristicii de refulare a unei frâne în cursul perioadei de exploatare depinde nu numai de compoziția amestecului de umplere ci și de configurația cavităților de lucru. Pentru distribuția uniformă a amestecului pulberulent sînt create zone de distribuție de rezervă, zone care asigură o deplasare rapidă a pulberii în locuri în care inducția magnetică are valori ridicate.

Puterea de comandă a frinei este determinată de o serie de parametri, printre care se pot enumera: mărimea întrefierului; valorile inducției magnetice; permeabilitatea magnetică a amestecului de umplere; coeficienții de rezervă aleși prin calcul, etc.

Pentru frînele proiectate și cercetate s-a ales un coeficient de rezervă pentru moment de 1,4 - 1,5, permeabilitatea magnetică a amestecului de umplere egală cu 5; iar inducția medie în întrefier de 0,8 - 0,95 T.

Circuitul magnetic s-a executat din oțel turnat, cu conținut de carbon sub 0,35%, iar secțiunea acestuia s-a ales pe considerentul că inducția maximă în piesele din oțel turnat să nu depășească 1,6 T.

Puterile calculate pentru excitație la FEP pentru momente cuprinse între 1000 - 12000 daN.m nu sînt mari, variînd între 1,2 kW și 5 kW.

La executarea în serie a frinelor proiectate piesele turnate au fost supuse unui tratament de recoacere, iar după prelucrarea mecanică și sudare au fost controlate la etanșeitate cu apă sub presiunea de 2 - 3 daN/cm<sup>2</sup>.

Principalele caracteristici ale FEP utilizate la instalațiile de foraj, pentru șirul de dimensiuni determinate prin calcul și cercetări asupra modelelor experimentale și a celor din exploatare sînt date în tabelul 3.

În acest tabel s-au făcut următoarele notații:  $M_m$  - momentul maxim de frinare; DA - durata de acționare;  $v_m$  - viteza maximă de rotație;  $P_m$  - puterea maximă la DA;  $P_{eq}$  - puterea echivalen-

tă de durată;  $D_{er}$  - diametrul exterior al rotorului;  $L_r$  - lungimea rotorului;  $\delta$  - valoarea întrefierului;  $B$  - inducția magnetică în întrefier;  $m$  - numărul întrefierurilor de lucru;  $P_{ex}$  - puterea de comandă (excitație);  $M$  - masa (în tone)

TABELUL 3: Principalele caracteristici ale FEP pentru instalații de foraj executate în U.R.S.S.

Tip	$M_m$ daN.m	DA %	$v_m$ rot. min.	$P_m$ kW	$P_{ec}$ kW	$D_{er}$ mm	$L_r$ mm	$\delta$ mm	B T	$P_{ex}$ kW	$M$ t
TEP 75	2600	20	525	300	60	800	140	2,5	0,92	1,8	2,0
TEP 125	4000	20	600	470	94	920	180	2,5	0,9	2,7	2,7
TEP 200	7000	20	475	800	136	1200	200	3,0	0,87	3,7	3,5
TEP 300	12000	45	485	800	400	1500	300	3,5	0,8	5,0	5,0

Cu mențiunea că  $m = 4$  pentru toate tipurile, acesta nu a mai fost trecut în tabel.

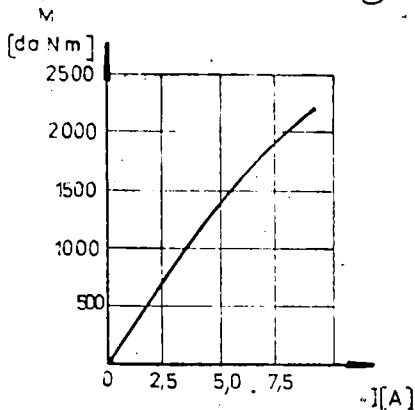


Fig.22. Caracteristica statică a frinei TEP 75.

Dependența momentului de frinare, la o greutate optimă a amestecului de umplere care asigură valori apropiate de cele calculate, față de curentul de excitație, pentru frina tip TEP 75 este reprezentată în figura 22. Această caracteristică ne duce la concluzia că sistemul magnetic nu este saturaț, iar momentul de frinare crește aproape liniar cu curentul de excitație în domeniul de lucru.

În S.U.A. a fost elaborată o serie de FEP /37/ la care răcirea este realizată cu apă și care sînt destinate pentru instalațiile de foraj de tip mediu și greu.

Rotoarele frinelor sînt prevăzute cu decupări longitudinale și ganțuri concentrice pe suprafața de lucru, în scopul dirijării pulberii feromagnetice. Etansarea rulmenților a fost realizată cu apărătoare și un grup de magneți permanenți împotriva pătrunderii amestecului pulverulent.

Caracteristicile funcționale ale acestor frine sînt redacte în tabelul 4 unde s-au introdus în plus față de tabelul anterior următoarele notații:  $Q$  - debitul apei de răcire;  $L_{xl}$  - di-

mensiunile de gabarit; h - înălțimea axului la centru; d - diametrul arborelui de cuplare.

**TABLELUL 4:** Principalele caracteristici ale FEP pentru instalații de foraj executate în S.U.A.

Tip	$M_M$ daN.m	$P_{ex}$ kW	$Q$ l/s	Lxl mm x mm	h mm	d mm	M kg.
1	415	2,0	4,5	437 x 330	229	76	410
2	830	2,0	4,5	543 x 406	280	89	590
3	1660	2,0	5,7	735 x 503	406	114	1590
4	4150	2,5	5,7	1090 x 482	560	152	2270
5	8300	3,0	7,5	1410 x 533	710	190	3630
6	13800	3,0	7,5	1625 x 533	760	203	5000

### 1.3. Concluzii

După cum rezultă din prezentarea anterioară a unor tipuri de FEP executate de firme specializate din străinătate, acestea se pot diferenția luând în considerare următoarele:

- la cupluri de frinare reduse și viteze de răspuns mari se utilizează rotoare de mică inerție, în general sub formă de cilindru cu pereți subțiri (pahar) și foarte rar cu rotoare conice, care pun probleme deosebite în privința realizării unui paralelism perfect între rotor și stator;

- la cupluri de frinare medii și ridicate frinele se execută cu rotor masiv, fie sub formă de roată dințată (obadă), fie sub formă de cilindru plin;

- în funcție de condițiile de lucru, dacă FEP funcționează în regim de alunecare de lungă durată, la probele de anduranță e necesar să se prevadă condiții de răcire suplimentară. Răcirea se poate face prin utilizarea unor radiatoare suplimentare confecționate de obicei din aluminiu turnat, prin însuflarea de aer rece cu ajutorul unui ventilator sau prin recircularea unui lichid de răcire (majoritatea constructorilor utilizând apa recirculată, cu toate că aceasta, în timp, prezintă depuneri pe canale și reduce eficiența răcirii, dar este cea mai ieftină);

- complexitatea dispozitivelor de frinare este impusă de utilizarea concretă a acestora, de timpul de răspuns, de modul în care se realizează etangarea lagărelor, de caracteristicile pulberii feromagnetice utilizate, de regimul de lucru (lungă sau

scurtă durată), ș.a.;

- în funcție de domeniul de aplicare și utilizare, caracteristicile FEP proiectate vor trebui verificate experimental în condiții de exploatare, deoarece apar o serie de factori necunoscuți de care va trebui să se țină cont în cercetările ulterioare.

Ținând cont de condițiile impuse prin /50/ în cadrul capitolelor următoare am procedat la proiectarea, executarea și experimentarea a două FEP, necesare pentru încercarea unor reductoare planetare pentru roboți industriali și centrale electro-electrice, utilaje cuprinse în planul de perspectivă al I.M.M.T.M. Baia Mare.

Orientarea cercetărilor proprii efectuate asupra FEP s-a făcut în următoarele direcții:

a. Determinarea analitică a repartiției principalelor mărimi ale câmpului electric și câmpului magnetic în regim variabil.

b. Stabilirea unei metode de proiectare pentru FEP, plecând de la indicațiile de proiectare date în literatura de specialitate referitoare la cuplaje electromagnetice cu pulbere executate în străinătate.

c. Proiectarea pe baza metodei propuse, și realizarea a două prototipuri experimentale de FEP cu momente nominale de 0,1 daN.m și 20 daN.m.

d. Experimentarea celor două modele pe standuri montate în laborator și în uzină în vederea stabilirii unor dimensiuni constructive, funcționale și a unor materiale utilizabile optime, atât din punct de vedere al costului de producție, cât și din punctul de vedere al performanțelor ce se realizează. Aceste experimentări s-au efectuat luând în considerare următoarele:

- stabilirea prin încercări a întrefierului optim de lucru, ținând cont și de posibilitățile tehnologice de realizare a acestuia;

- realizarea circuitului magnetic cu materiale procurabile din țară, la costuri de producție reduse și la un grad de prelucrări mecanice minim;

- determinarea prin încercări a elementelor separator care din pulberea feromagnetică ce asigură valoarea maximă a momentului transmis și nu duc la aglomerarea și sinterizarea amestecului de umplere;

- determinarea, pe cale experimentală a volumului de umplere a întrefierului cu amestecul de umplere la o valoare opti-

ni, care asigură valoarea maximă a cuplului de frinare la un curent de excitație dat;

- obținerea unor gabarite și greutateți reduse;
- utilizarea unor materiale nemagnetice ușor procurabile din țară;

- verificarea experimentală a caracteristicilor mecanice, statice și dinamice ale frinelor supuse cercetărilor;

- verificarea fenomenului de "îmbătrânire" a pulberii feromagnetice utilizate în funcție de durata de efectuare a încercărilor și după aceea în exploatare.

Decarece prin lucrarea /50/ s-a prevăzut executarea unor FLP pentru funcționare în regim de scurtă durată, proiectarea acestora s-a făcut fără a se prevedea dispozitive suplimentare de răcire, urmind ca în urma experimentărilor și rezultatelor obținute, în funcție de necesități să luăm în considerare și asigurarea de răcire suplimentară, pentru utilizarea dispozitivelor în probe de lungă durată.

## C A P I T O L U L 2

### CONTRIBUTII LA DETERMINAREA ANALITICA A MARIMILOR ELECTRICE SI MAGNETICE

#### 2.1. Notatii utilizate

- $J$  - densitate de curent ( $A/m^2$ ).  
 $E$  - intensitatea câmpului electric ( $V/m$ ).  
 $B$  - inducția magnetică (T).  
 $H$  - intensitatea câmpului magnetic ( $A/m$ ).  
 $\epsilon$  - permitivitatea electrică (F/m).  
 $\mu$  - permeabilitatea magnetică relativă (H/m).  
 $\mu_0$  - permeabilitatea magnetică a vidului.  
 $\sigma$  - conductanță electrică ( $1/\Omega$ ).  
 $\rho$  - rezistivitate electrică ( $\Omega \cdot m^{-1}$ ).  
 $\omega$  - viteză unghiulară =  $2\pi f$  (radiani/secundă).  
 $t$  - timp (s).  
 $\pi = 3,14$ .  
 $\lambda$  - lungime de undă (m).  
 $j = \sqrt{-1}$ .  
 $e$  - baza logaritmilor naturali = 2,718.  
 $\alpha = \sqrt{\mu\mu_0\omega/2\sigma} = 1/d \cdot m^{-1}$ .  
 $d$  - adâncime de pătrundere (m).  
 $k$  - operator auxiliar,  $k = 4\pi^2/\lambda^2 + 2j\alpha^2$ .  
 $A_1, A_2$  - constante complexe.  
 $\phi$  - unghi auxiliar.  
 $\beta, \gamma$  - cantități auxiliare.  
 $x$  - direcție periferică în stator (m).  
 $y$  - direcție radială în stator (m).  
 $z$  - direcție axială (m).  
 $i, j, k$  - versori elementari  
 $f$  - cantitate de calcul,  $f = \omega t - 2\pi x/\lambda - \pi y$ .  
 $W$  - pierderi de putere specifice ( $W/m^2$ ).  
 $\Phi_{ap}$  - flux fundamental total/pol (Wb).

#### 2.2. Generalități

Pentru studiul teoretic al FEP, adică determinarea analitică a repartiției densității de curent  $J$ , intensității câmpului electric  $E$ , intensității câmpului magnetic  $H$ , inducția magnetică

U, precum și pierderile statice ne vom folosi de formele locale ale legilor generale referite la câmpul electromagnetic variabil [3, 6, 44, 49, 70, 71, 78], pentru medii imobile ( $v = 0$ ) și fără discontinuități, care obișnuit în literatură sînt cunoscute sub numele de ecuațiile lui Maxwell și pot fi enunțate astfel:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H} &= \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J}, \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \\ \operatorname{div} \vec{D} &= \rho_v, \\ \operatorname{div} \vec{B} &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

În cazul în care vom considera un mediu izotrop, omogen și liniar, fără polarizație electrică permanentă și fără cîmp electric imprimat, atunci sînt valabile următoarele legi de material:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}; \quad \vec{B} = \mu \vec{H}; \quad \vec{J} = \sigma \vec{E}. \quad (2)$$

Dacă vom considera mediul fără sarcină electrică ( $\rho_v = 0$ ) și vom ține cont de (2), ecuațiile lui Maxwell devin:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H} &= \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \sigma \vec{E}, \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \\ \operatorname{div} \vec{E} &= 0, \\ \operatorname{div} \vec{H} &= 0, \end{aligned} \quad (3)$$

unde intervin numai mărimile  $\vec{E}$  și  $\vec{H}$ .

Acest sistem de ecuații, în coordonate carteziene se poate scrie sub forma:

$$\begin{cases} \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} = \sigma E_x + \epsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} \\ \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} = \sigma E_y + \epsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = \sigma E_z + \epsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} \end{cases}; \quad \begin{cases} \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = -\mu \frac{\partial H_x}{\partial t} \\ \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -\mu \frac{\partial H_z}{\partial t} \end{cases}; \quad (4)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial H_x}{\partial x} + \frac{\partial H_y}{\partial y} + \frac{\partial H_z}{\partial z} = 0.$$

Pentru cazul unui mediu conductor (cazul frinelor electromagnetice) unde se poate neglija curentul de deplasare, în [70] se arată că aceste ecuații devin:

$$\nabla^2 E - \sigma M \frac{\partial E}{\partial t} = 0, \quad \nabla^2 H - \sigma M \frac{\partial H}{\partial t} = 0. \quad (5)$$

Considerând sistemul de coordonate  $x, y, z$ , cu axa  $z$  de-a lungul axei de rotație, densitatea de curent  $J$  va avea o valoare constantă pe direcția acestei axe, adică nu depinde de coordonata  $z$ , ci depinde de coordonatele  $x, y$  și timpul de propagare  $t$ . De asemenea, considerând că la un anumit moment, valoarea permeabilității magnetice în întregul este constantă (acest lucru se datorește faptului că valoarea acesteia este unică pentru o anumită valoare a intensității câmpului magnetic, mai bine zis a curentului de excitație) și considerând statorul ca un număr infinit de conductoare (pătrunderea câmpului electromagnetic în mediul masiv /70/), folosindu-ne de ecuațiile lui Maxwell, pentru determinarea mărimilor amintite, se pot lua în considerare următoarele ipoteze:

- Densitatea de curent  $J$  este axială în tot domeniul.
- Densitatea de curent  $J$  este repartizată sinusoidal în timp și spațiu pe suprafața statorului.
- Se alege sistemul de coordonate ca în figura 23, adică:
  - $x$  - la periferia statorului;
  - $y$  - în suprafața statorului ( $y=0$  la marginea întregului);
  - $z$  - de-a lungul axei de rotație.
- Statorul este considerat ca material magnetic omogen.
- Sistemul de coordonate este solidar legat de stator.
- Permeabilitatea magnetică este considerată constantă la momentul respectiv.
- Se neglijează efectul de capăt.

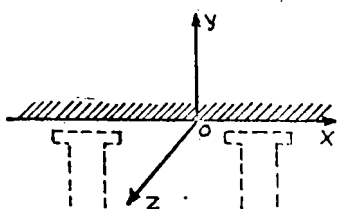


Fig.23. Explicativă

la ipoteza c. este solidar legat de stator.

### 2.3. Repartiția densității de curent $J$

În cazul frecvențelor scăzute, în orice metal, densitatea de curent e dată de ecuația difuziei, ecuație ce se obține din (57) și care are expresia:

$$\nabla^2 \bar{J} = \frac{\mu M_0}{\rho} \cdot \frac{\bar{J}}{t} \quad (6)$$

Conform ipotezei a.,  $J_x = J_y = 0$ , deci  $J = J_z$ .

Deoarece densitatea de curent  $J$  nu depinde de coordonata



z avem:

$$\frac{\partial J}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial^2 J}{\partial z^2} = 0. \quad (7)$$

Dezvoltind ecuația (5) și ținând cont de cele arătate se va obține:

$$\frac{\partial^2 J_z}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 J_z}{\partial y^2} = \frac{\mu \mu_0}{\rho} \cdot \frac{\partial J_z}{\partial t}. \quad (8)$$

Soluția ecuației (8) este de forma:

$$J_z = J(y) \cdot \cos(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda}),$$

sau, scrisă sub formă exponențială devine:

$$J_z = \text{Re } J(y) \cdot e^{j(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda})}.$$

În soluția prezentată  $J(y)$  este o funcție de coordonata  $y$  și se determină din condițiile de frontieră (de limită) /1, 4, 11, 23, 25, 32/.

Înlocuind în (8) forma exponențială, vom avea pe rînd:

$$\frac{\partial J_z}{\partial x} = -j \frac{2\pi}{\lambda} \cdot J(y) \cdot e^{j(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda})},$$

$$\frac{\partial^2 J_z}{\partial x^2} = -J(y) \cdot \frac{4\pi^2}{\lambda^2} \cdot e^{j(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda})},$$

$$\frac{\partial^2 J_z}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 J(y)}{\partial y^2} \cdot e^{j(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda})},$$

$$\frac{\partial J_z}{\partial t} = J(y) \cdot j\omega \cdot e^{j(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda})}.$$

Cu aceste precizări, ecuația (8) va deveni:

$$\frac{\partial^2 J(y)}{\partial y^2} - J(y) \cdot \frac{4\pi^2}{\lambda^2} = \frac{j\omega \mu \mu_0}{\rho} \cdot J(y) \text{ sau,}$$

$$\frac{\partial^2 J}{\partial y^2} = J \left( \frac{4\pi^2}{\lambda^2} + \frac{j\omega \mu \mu_0}{\rho} \right) = 0. \quad (9)$$

În cazul în care vom face substituția:

$$\alpha^2 = \omega \mu \mu_0 / 2\rho \text{ sau } \alpha = \sqrt{\omega \mu \mu_0 / 2\rho} \text{ avem:}$$

$$\frac{\partial^2 J}{\partial y^2} = J \left( \frac{4\pi^2}{\lambda^2} + 2j\alpha^2 \right) = 0.$$

Dacă vom nota  $k^2 = \frac{4\pi^2}{\lambda^2} + 2j\alpha^2$  obținem ecuația:

$$\frac{\partial^2 J}{\partial y^2} - k^2 J = 0. \quad (10)$$

Soluția unei ecuații de forma (10), după [12, 26, 70, 71] are următoarea expresie:

$$J = A_1 \cdot e^{ky} + A_2 \cdot e^{-ky}, \quad (11)$$

unde  $A_1$ ,  $A_2$  și  $k$  reprezintă cantități complexe.

Practic, dacă în soluția (11) se înlocuiește valoarea complexă a lui  $k$  (cunoscută și sub numele de constantă de propagare) se obține ecuația unei unde directe și a unei unde inverse.

Constantele complexe  $A_1$  și  $A_2$  se pot determina din condițiile de frontieră. Astfel, pentru  $y = \infty$ ,  $J$  nu poate avea o valoare infinită ceea ce ne duce la concluzia că  $A_1 = 0$ . În cazul în care  $y = 0$ , densitatea de curent  $J$  are o valoare maximă, fiind la suprafața statorului, adică  $J = J_m$ , rezultând că  $A_2 = J_m$ .

În acest fel, soluția ecuației (10) devine:

$$J_z = J_m \cdot e^{-ky} \cdot \cos(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda}), \quad (12)$$

ceea ce ne arată că valoarea lui  $J_z$  în amplitudine și fază, în raport cu sistemul de coordonate ales, este o funcție de  $x$ ,  $y$ ,  $t$  și termenul  $k$  care este o cantitate complexă.

Înlocuind această cantitate complexă  $k = A \cdot e^{j\phi}$  sau,

$$k^2 = \frac{4\pi^2}{\lambda^2} + 2j\alpha^2 = A^2 \cdot e^{2j\phi} \quad \text{unde: } A^2 = \left(\frac{4\pi^2}{\lambda^2}\right)^2 + (2\alpha^2)^2,$$

$$2\phi = \arctg \frac{2\alpha^2}{4\pi^2/\lambda^2},$$

ecuația (12) va deveni:

$$\begin{aligned} J_z &= J_m \cdot e^{-A \cdot e^{j\phi} y} \cdot \cos(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda}) = \\ &= J_m \cdot e^{-A \cdot e^{j\phi} y} \cdot e^{j(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda})}. \end{aligned} \quad (13)$$

Ținând cont că  $e^{j\phi} = \cos\phi + j \cdot \sin\phi$ , ecuația (13) se poate scrie:

$$\begin{aligned} J_z &= J_m \cdot e^{-yA \cos\phi} \cdot e^{-jyA \sin\phi} \cdot e^{j(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda})} = \\ &= J_m \cdot e^{-yA \cos\phi} \cdot \frac{e^{j(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda})}}{e^{jyA \sin\phi}}. \end{aligned}$$

Cu aceste precizări vom obține:

$$J_z = J_m \cdot e^{-yA \cos \delta} \cdot e^{j(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda} - yA \sin \delta)} \quad (14)$$

Dacă în continuare vom nota:  $A \cos \delta = \beta$ ,  $A \sin \delta = \gamma$ , atunci (14) va lua următoarele forme:

$$\begin{aligned} J_z &= J_m \cdot e^{-\beta y} \cdot e^{j(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda} - \gamma y)} = \\ &= J_m \cdot e^{-\beta y} \cdot \cos(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda} - \gamma y) \end{aligned} \quad (14')$$

#### Observații

Dacă  $2\alpha^2 \gg 4\pi^2/\lambda^2$ , adică  $\sqrt{2}\alpha \gg 2\pi/\lambda$  ceea ce impune ca:

$$A \rightarrow \sqrt{2}\alpha; \quad \beta \rightarrow \alpha; \quad \gamma \rightarrow \alpha, \text{ atunci } tg 2\delta \rightarrow \infty \text{ și } \delta = \frac{\pi}{4}.$$

Cu aceste precizări, ecuația simplificată a densității de curent va fi:

$$J_z = J_m \cdot e^{-\alpha y} \cdot \cos(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda} - \alpha y). \quad (15)$$

Conform ecuației (15) rezultă că la orice adâncime  $y$  în stator, variația lui  $J_z$  în raport cu timpul și poziția periferică  $x$  are o distribuție sinusoidală.

#### 2.4. Repartiția intensității câmpului electric E

Pentru a determina modul în care este distribuită intensitatea câmpului electric  $E$ , se pornește de la relația dintre densitatea de curent  $J$ , rezistivitatea electrică  $\rho$  și intensitatea câmpului electric  $E$ , adică:  $\vec{E} = \rho \vec{J}$ .

Cunoscând distribuția densității de curent  $J$ , avem:

$$E_z = \rho \cdot J_m \cdot e^{-(\beta + \gamma)y} \cdot e^{j(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda})} \text{ sau, } (16)$$

sub formă simplificată, ținând cont de relația (15), rezultă:

$$E_z = \rho \cdot J_m \cdot e^{-\alpha y} \cdot \cos(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda} - \alpha y) \quad (16')$$

Ca și în cazul anterior, ultima ecuație ne arată că variația lui  $E_z$  în raport cu timpul și poziția periferică  $x$  are o repartiție sinusoidală, pentru orice adâncime  $y$  în stator.

#### 2.5. Repartiția intensității câmpului magnetic H

Deoarece în 2.2. am arătat că  $J_z$  se poate considera constantă în direcția axei  $z$  și conform ipotezei a.  $J_x = J_y = 0$ , unde  $J = J_z$ , ceea ce ne arată că  $\partial J_z / \partial x = 0$ , ținând cont de faptul că  $E = \rho J$  rezultă că  $E_x = E_y = 0$ , precum și faptul că  $\partial E / \partial x = \partial E / \partial y = 0$ .

Din ecuațiile lui Maxwell mai avem:

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu\mu_0 \cdot \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (17)$$

Dezvoltind sub formă de produs vectorial primul membru al ecuației (17), cu ajutorul versorilor elementari  $i'$ ,  $j'$ ,  $k'$ , acesta devine:

$$\nabla \times \vec{E} = \begin{vmatrix} i' & j' & k' \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ E_x & E_y & E_z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} i' & j' & k' \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & E_z \end{vmatrix} = i' \frac{\partial E_z}{\partial y} - j' \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (18)$$

Descompunând intensitatea cîmpului magnetic după cei trei versori elementari avem:

$$\vec{H} = i' H_x + j' H_y + k' H_z \text{ și } \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = i' \frac{\partial H_x}{\partial t} + j' \frac{\partial H_y}{\partial t} + k' \frac{\partial H_z}{\partial t}. \quad (19)$$

Folosindu-ne de (17) și (18) rezultă:

$$i' \frac{\partial E_z}{\partial y} - j' \frac{\partial E_z}{\partial x} = -\mu\mu_0 \left( i' \frac{\partial H_x}{\partial t} + j' \frac{\partial H_y}{\partial t} + k' \frac{\partial H_z}{\partial t} \right) \quad (20)$$

Efectuînd identificarea termenilor la ultima ecuație, considerînd constantele de integrare nule, rezultă că  $\partial H_z / \partial t = 0$  ceea ce ne duce la concluzia că intensitatea cîmpului magnetic în direcția axei  $z$  este nulă.

În aceste condiții, ecuația (20) fiind o ecuație cu variabile separabile și, făcînd uz de  $e^{j\omega t}$ , putem scrie:

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} = -\mu\mu_0 \omega j H_x; \quad \frac{\partial E_z}{\partial x} = \mu\mu_0 \omega j H_y \quad (21)$$

Pentru determinarea componentelor  $H_x$  și  $H_y$  ale cîmpului magnetic, pornind de la ecuațiile (16) și (21), vom avea succesiv:

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} = -\rho(\beta + jr) \cdot J_m \cdot e^{-(\beta + jr)y} \cdot e^{j(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda})}. \text{ Din (21),}$$

$$H_x = -\frac{1}{\mu\mu_0 j \omega} \cdot \frac{\partial E_z}{\partial y} = \frac{\rho}{\mu\mu_0 j \omega} (\beta + jr) \cdot J_m \cdot e^{-(\beta + jr)y} \cdot$$

$$\cdot e^{j(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda})}.$$

Dar,  $\alpha^2 = \mu\mu_0 \omega / 2\rho$  adică  $2\alpha^2 = \mu\mu_0 \omega / \rho$ , deci:

$$H_x = \frac{1}{2\alpha^2 j} (\beta + jr) \cdot J_m \cdot e^{-\beta y} \cdot e^{j(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda} - ry)}.$$

Ținînd cont de faptul că  $\frac{1}{j}(\beta + jr) = -j(\beta + jr) = r - \beta j$  rezultă:

$$H_x = \frac{\delta - j\beta}{2\alpha^2} \cdot J_m \cdot e^{-\beta y} \cdot e^{j(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda} - \gamma y)} =$$

$$= \frac{\delta - j\beta}{2\alpha^2} \cdot J_m \cdot e^{-\beta y} \cdot (\cos \varphi + j \sin \varphi), \text{ unde am notat:}$$

$\varphi = \omega t - \frac{2\pi x}{\lambda} - \gamma y$ .  $H_x$  se mai scrie:

$$H_x = \frac{J_m \cdot e^{-\beta y}}{2\alpha^2} \cdot (\gamma \cos \varphi - j\beta \sin \varphi - j\beta \cos \varphi + \beta \sin \varphi).$$

Reținând numai partea reală a lui  $H_x$  obținem:

$$H_x = \frac{J_m}{2\alpha^2} \cdot e^{-\beta y} \cdot \left[ \cos(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda} - \gamma y) + \sin(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda} - \gamma y) \right]$$

Ținând cont de notațiile:  $\beta = \lambda \cdot \cos \delta$ ;  $\gamma = \lambda \cdot \sin \delta$ ;  $\lambda^2 = \beta^2 + \gamma^2$ ;  $\sin \delta = \gamma/\lambda$  și  $\cos \delta = \beta/\lambda$ , expresia părții reale a lui  $H_x$  este:

$$H_x = \frac{J_m}{2\alpha^2} \cdot e^{-\beta y} \cdot \left[ \lambda \sin \delta \cdot \cos(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda} - \gamma y) + \right.$$

$$\left. + \lambda \cos \delta \cdot \sin(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda} - \gamma y) \right].$$

Știind că  $\sin C \cdot \cos D + \sin D \cdot \cos C = \sin(C + D)$  rezultă:

$$H_x = \frac{\lambda J_m}{2\alpha^2} \cdot e^{-\beta y} \cdot \sin(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda} - \gamma y + \delta). \quad (22)$$

În mod similar, din (16) și (22) avem:

$$\frac{\partial E_z}{\partial x} = -j \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \rho \cdot J_m \cdot e^{-(\beta + j\gamma)y} \cdot e^{j(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda})},$$

$$H_y = \frac{1}{\mu_0 j \omega} \cdot \frac{\partial E_z}{\partial x} =$$

$$= \frac{1}{2j\alpha^2} \cdot (-j \frac{2\pi}{\lambda}) \cdot J_m \cdot e^{-\beta y} \cdot e^{j(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda} - \gamma y)}.$$

Efectuând calculele intermediare și ținând cont de precizările făcute la  $H_x$ , reținând numai partea reală, obținem:

$$H_y = -\frac{\pi}{\lambda \alpha^2} \cdot J_m \cdot e^{-\beta y} \cdot \cos(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda} - \gamma y). \quad (23)$$

Observații.

Dacă  $\sqrt{2}\alpha \gg 2\pi/\lambda$ ,  $A \rightarrow \sqrt{2}\alpha$ ,  $\delta \rightarrow \alpha$ ;  $\delta \rightarrow \frac{\pi}{4}$ ,  $\beta \rightarrow \alpha$  și va rezulta:

$$H_x = \frac{\sqrt{2}\alpha}{2\alpha^2} \cdot J_m \cdot e^{-\alpha y} \cdot \sin(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda} - \gamma y + \frac{\pi}{4}) = \frac{J_m}{\sqrt{2}\alpha} \cdot \left[ 45^\circ \right],$$

$$H_y = -\frac{2\pi/\lambda}{2\alpha^2} \cdot J_m \cdot e^{-\alpha y} \cdot \cos(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda} - \gamma y) = \frac{\pi}{\lambda \alpha^2} \cdot J_m.$$

Cu aceste precizări, dacă  $\sqrt{2}\alpha \gg 2\pi/\lambda \Rightarrow H_x \gg H_y$  și:

- $H_y$  este defazat cu  $180^\circ$  în urmă față de  $J_z$ ;
- $H_x$  conduce pe  $J_z$  cu  $\pi/4$  în tot statorul;
- $H_x$  imprimă (redă) valoarea rezultantă a lui  $H$ .

Din punct de vedere fizic, predominanța lui  $H_x$  față de  $H_y$  poate fi interpretată astfel: când cîncimea de pătrundere este mică întreg fluxul ce trece de la pol la pol este conținut de o secțiune redusă, ceea ce imprimă o valoare ridicată a densității de flux. Pe direcția acestui flux, rezultă că trebuie să existe o tensiune magnetomotoare apreciabilă pe direcția axei  $x$ . În cazul în care este îndeplinită condiția  $\sqrt{2}\alpha \gg 2\pi/\lambda$  intensitatea câmpului magnetic e dată de :

$$H = \frac{J_m \cdot e^{-\alpha y}}{\sqrt{2} \alpha} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda} - \alpha y + \frac{\pi}{4}\right) = \frac{J_z}{\sqrt{2} \alpha} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda} - \alpha y + \frac{\pi}{4}\right) \quad (22)$$

Expresia generală a rezultantei  $H$  este o elipsă descrisă de parametrii ce intervin în ecuațiile (22) și (23).

În cazul în care  $\sqrt{2}\alpha$  nu este dominant față de  $2\pi/\lambda$ , atunci  $H_x$ , conform ecuației (22) se va exprima prin:

$$H_x = \frac{\Lambda \cdot J_m \cdot e^{-\beta y}}{2\alpha^2} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda} - \beta y + \delta\right) = \frac{\Lambda \cdot J_z}{2\alpha^2} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda} - \beta y + \delta\right),$$

unde:

$$\delta = \frac{1}{2} \arctg \frac{2\alpha^2}{4\pi^2/\lambda^2}.$$

## 2.6. Repartiția inducției magnetice $B$

Conform ecuației:

$$H_y = -\frac{\pi}{\lambda \alpha^2} \cdot J_m \cdot e^{-\beta y} \cdot \cos\left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda} - \beta y\right) = -\frac{\pi}{\lambda \alpha^2} \cdot J_z$$

și considerînd că pe tot domeniul  $\mu\mu_0$  este constant, rezultă:

$$B_y = \mu\mu_0 \cdot H_y = -\frac{\pi}{\lambda \alpha^2} \cdot \mu\mu_0 \cdot J_z.$$

Prin definiție,  $\alpha^2 = \mu\mu_0 \cdot \omega / 2\rho$ , deci:

$$B_y = -\frac{\pi}{\lambda} \cdot \frac{2\rho}{\mu\mu_0 \omega} \cdot \mu\mu_0 \cdot J_z = -\frac{\pi}{\lambda} \cdot \frac{2\rho}{\omega} \cdot J_z. \quad (25)$$

Din analiza ecuației (25) rezultă că, în tot spațiul,  $B_y$  este defazat în urmă cu  $180^\circ$  față de  $J_z$ .

În cazul în care vom lua în considerare numai repartiția densității de flux fundamentală în întrefier, adică la  $y = 0$ , conform ecuației (14') și (25), vom obține:

$$J_z \Big|_{y=0} = J_m \cdot \cos\left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda}\right) \text{ și,}$$

$$B_y|_{y=0} = -\frac{2\rho\pi}{\lambda\omega} \cdot J_m \cdot \cos(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda}). \quad (26)$$

Valoarea medie a inducției magnetice la suprafață este:

$$B_y = \frac{2}{\pi} \frac{2\rho\pi}{\lambda\omega} \cdot J_m = \frac{4\rho}{\lambda\omega} \cdot J_m. \quad (27)$$

Valoarea fluxului/pol produs este dată de: valoarea medie  $B_y$  înmulțită cu lungimea polului (1/2), rezultând fundamentala fluxului/pol:

$$\Phi_{sp} = \frac{4\rho}{\lambda\omega} \cdot J_m \cdot \frac{1}{2} = \frac{2\rho}{\lambda\omega} \cdot J_m. \quad (28)$$

Expresia obținută corespunde expresiei uzuale a fluxului/pol din cazul generatorilor de curent alternativ.

### 2.7. Calculul pierderilor statorice W

Energia totală pe unitatea de lungime în partea activă a statorului se calculează integrând  $\rho \cdot J^2$  pe întregul volum al statorului pe o perioadă de timp, adică:

$$W = \iiint \rho \cdot J_m^2 \cdot dt \cdot dx \cdot dy = \\ = \iiint \rho \cdot J_m^2 \cdot e^{-2y\beta} \cdot \cos^2(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda} - \beta y) \cdot dy \cdot d[f(t, x)].$$

Deoarece  $(\cos^2)$  din expresia de mai sus depinde de  $\omega$ ,  $x$  și  $t$ , valoarea maximă a funcției sinusoidale pe o perioadă de timp este egală cu 1/2. Dependența de  $y$  prin termenul  $\beta y$  reprezintă un simplu defazaj și nu modifică valoarea integralei care va rezulta:

$$W = \frac{\rho \cdot J_m^2}{2} \cdot \int_0^\infty e^{-2\beta y} \cdot dy = \frac{\rho \cdot J_m^2}{4\beta}. \quad (29)$$

În ipoteza că  $\sqrt{2} \gg 2\pi/\lambda$  atunci  $\beta \rightarrow \alpha$  și

$$W = \frac{\rho \cdot J_m^2}{4\alpha}$$

Folcsindu-ne de ecuațiile (28), (29) și luând în considerare numai valorile maxime ale lui  $H$  și  $J$ , adică  $H_m = J_m \sqrt{2}\alpha$  și  $J_m = \sqrt{2}\alpha H_m$ , vom obține:

$$W = \frac{\rho \cdot 2\alpha^2 \cdot H_m^2}{4\alpha} = \frac{\rho}{2} \cdot \alpha \cdot H_m^2.$$

Știind că  $\alpha^2 = \omega \mu_0 / 2\rho$  și înlocuind în expresia ultimă avem:

$$W = \rho \cdot \sqrt{\frac{\mu_0 \omega}{2}} \cdot H_m^2 \cdot \frac{1}{2}. \quad (30)$$

Analiza ultimei relații obținute ne permite să determinăm valoarea  $\mu_0$  în raport de câmpul magnetic, pierderile de putere, frecvența și rezistivitatea electrică.

## C A P I T O L U L 3

### CONTRIBUTII TEORETICE LA PROIECTAREA FEP

#### 3.1. Considerații generale

La proiectarea FEP trebuie să se țină cont în primul rând de condițiile în care lucrează, alegându-se parametrii principali în corespondență cu cerințele ridicate: timpul de funcționare în regim de alunecare devine un factor determinant la proiectarea corespunzătoare a frinei.

Pentru obținerea unor rezultate bune în exploatare, ținând seama de faptul că viteza de desfășurare a procesului tranzitoriu, gradul de liniaritate al caracteristicii statice, gradul de stabilitate al caracteristicii, durata de funcționare și natura mediului ambiant sînt condiționate de constanta de timp. La alegerea variantei constructive și a schemei circuitului magnetic, se va ține cont de acestea. Pentru a obține valori cît mai mici ale constantei de timp e necesar ca momentul de inerție al rotorului să fie cît mai mic. Caracteristica statică poate fi menținută liniară numai dacă toate părțile circuitului magnetic și materialului de umplere lucrează pe porțiunea liniară a curbei de magnetizare, deoarece orice saturație duce la abaterea de la forma liniară.

De asemenea, la proiectarea FEP e necesar să fie luată în considerare o serie de factori constructivi, cum ar fi de exemplu valoarea întrefierului de lucru, care depinde mult de dimensiunile geometrice ale părților în rotație și de mărimile funcționale care trebuie asigurate. Valoarea întrefierului de lucru se alege de obicei mai mare decît în cazurile obișnuite, pentru a mărita stabilitatea caracteristicii statice /72/. La alegerea mărimii întrefierului de lucru e necesar să se țină cont și de posibilitățile tehnologice de executare, pentru ca acesta să fie uniform pe toată periferia rotorului și statorului. În acest sens, în /30/ se arată că la abateri inevitabile ale uniformității, datorate de excentricitate repartiția fluxului magnetic se face ca în figura 24. Deoarece inducția în întrefier este invers proporțională cu valoarea acestuia, vom avea:



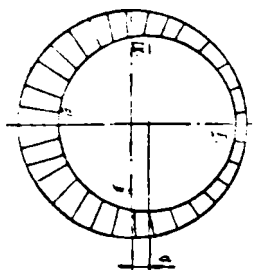


Fig. 24. Explinație la concentricitate.

$$\frac{B_I}{B_{III}} = \frac{\delta_{III}}{\delta_I}$$

unde, referitor la figura 24 s-a notat cu  $B_I$  - inducția magnetică în zona I,  $B_{III}$  - inducția magnetică în zona III,  $\delta_I$  și  $\delta_{III}$  valorile întrefierului în aceste zone după [30].

Dacă întrefierul nominal este egal cu 0,2 mm, iar excentricitatea  $a = 0,02$  mm, raportul  $B_I/B_{III} = 0,22/0,18 = 1,22$ .

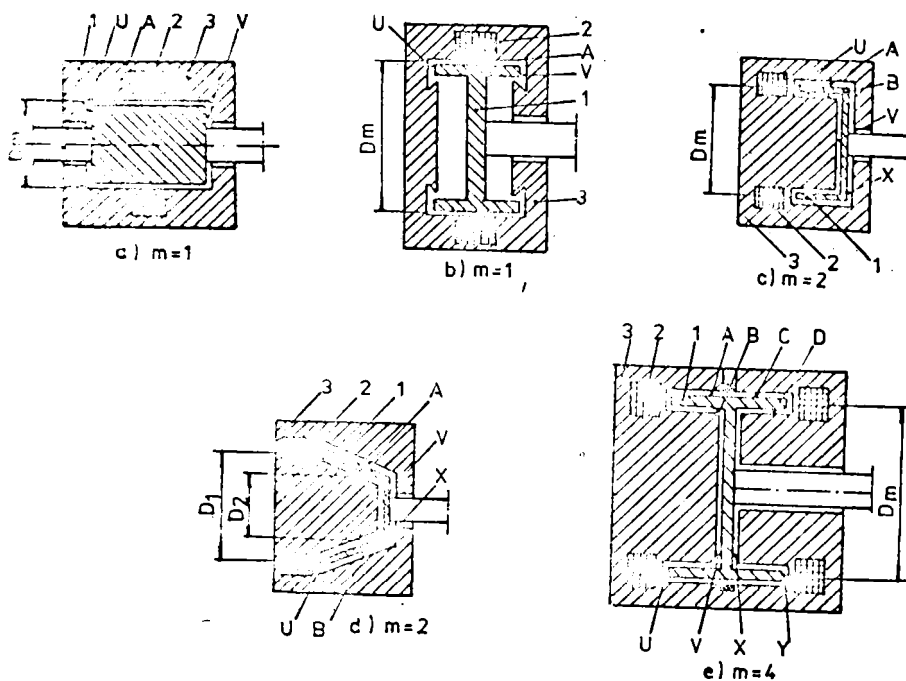


Fig. 25. Variante constructive ale FEP: a) - cu rotor cilindric plin; b) - cu rotor tip roată dințată; c) - cu rotor cilindric cu pereți subțiri; d) - cu rotor conic cu pereți subțiri; e) - cu rotor masiv sub formă volant.

Deoarece forța de atracție magnetică e proporțională cu pătratul inducției rezultă că raportul dintre eforturile radiale în porțiunile I și III va fi de 1/1,49. Considerând că inducția medie este de 1 T se arată că efortul specific de atracție pe porțiunea I este mai mare cu 1,6 daN/cm<sup>2</sup> decât pe porți-

unca III, acționând asupra pieselor în rotație și reazemelor.

Conform exemplului menționat, rezultă că utilizarea unor întrefieruri suplimentare mici favorizează creșterea eforturilor radiale asupra reazemelor, în funcție de poziția întrefierului.

Din punct de vedere constructiv, FEP pot fi realizate în mai multe variante, considerându-se ca întrefier de lucru\*\* (unul sau mai multe) porțiunea de întrefier ce se umple cu amestec pulverulent care contribuie efectiv la realizarea momentului de frinare fiind plasat perpendicular pe direcția liniilor de câmp magnetic. Întrefierurile suplimentare au o contribuție redusă la funcționarea dispozitivului, porțiunile pe care sînt realizate reducându-se la dimensiuni cît mai mici posibile.

Variantele constructive ale FEP, posibil de realizat tehnologic, sînt redate în figura 25, unde: m - numărul întrefierurilor de lucru; A,B,C,D - întrefieruri de lucru; U,V,X,Y,Z - întrefieruri suplimentare.

Valorile recomandate ale întrefierului de lucru\*\* pentru cazul unor cuplaje electromagnetice cu pulbere de putere medie sînt limitate între 0,5 și 3 mm; iar numărul întrefierurilor se alege în funcție de varianta constructivă adoptată. Orientativ, aceste valori sînt redate în tabelul 5 după /42/ unde:  $k_g$  - cuplul nominal;  $\delta$  - mărimea (lățimea) întrefierului;  $k_g = b_g/D_m$  - raportul dintre lungimea întrefierului și diametrul mediu al acestuia; m - numărul de întrefieruri.

TABELUL 5: Valori orientative pentru  $\delta$ ,  $k_g$  și m /42/.

$M_n$ daN.m	$\delta$ mm	$k_g = b_g/D_m$	m
Pînă la 0,01	0,25 - 0,3	0,3 - 0,25	2
0,01 - 0,1	0,4 - 0,8	0,2 - 0,15	2
0,1 - 1	0,7 - 1,2	0,16 - 0,14	2
1 - 10	1,2 - 1,6	0,14 - 0,12	2
10 - 100	1,5 - 2	0,12 - 0,10	2
100 - 1000	1,8 - 3	0,10 - 0,08	2

Considerăm că încadrarea în limitele indicate pentru  $k_g$  nu este obligatorie pentru cazul FEP, mai cu seamă că în /22/ se indică orientativ  $k_g = 0,12 - 0,4$ , deoarece dimensiunile de gabarit sînt determinate și de diametrele arborilor sau înălțimi-

\*\* În continuare vom scrie simplu "întrefier" sau "întrefieruri"

nea centrului axelor motoarelor și alte mașini.

De asemenea, ținând cont că în cazul FBP statorul este inelabil, considerăm că încadrarea în limitele indicate nu este obligatorie. Astfel, la frânele executate de firma Jaeger /89/ în varianta din figura 25b și firma Vibrometer /94/ în varianta din figura 25a valoarea lui  $k_g$  este cuprinsă între 0,3 - 0,8.

Valoarea absolută a permeabilității magnetice a materialului de umplere este determinată de calitatea pulberii feromagnetice folosite și de proporția, în greutate, dintre aceasta și materialul separator. Experimental, s-a stabilit că, în gama întrefierurilor de la 0,5 la 1,5 mm, permeabilitatea magnetică a materialului de umplere poate fi considerată  $(4 - 8) \cdot 10^{-6}$  H/m, adică de circa (3,5 - 7) ori mai mare decât permeabilitatea magnetică a vidului /22, 35, 53, 54, 73, 74, 77/.

În lucrarea /53/ este reprezentată dependența efortului specific de rezistență la deplasare sau efortului specific de cuplare  $\tau$  în  $\text{daN/cm}^2$  în funcție de valoarea întrefierului  $\delta$ , la diferite inducții  $B$  în acesta, pentru un cuplaj electromagnetic cu pulbere cu două întrefieruri, utilizând ca pulbere feromagnetică un amestec cu fier carbonil. Conform figurii 26, după /53/, se poate observa că pentru valori ale inducției de 0,1 - 1,3 T, mărimea întrefierului  $\delta$  are o influență considerabilă asupra lui  $\tau$ , ceea ce ne duce la concluzia că va influența și valoarea permeabilității magnetice a materialului de umplere.

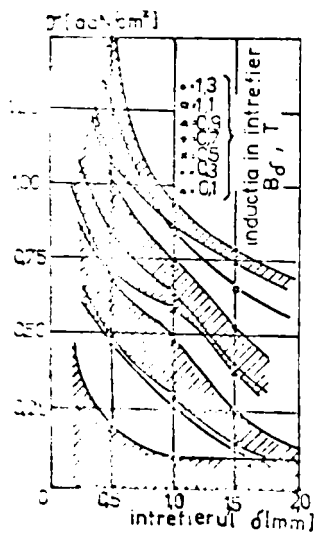


Fig. 26. Dependenta lui  $\tau$  de  $\delta$  și  $B$  după /53/.

Astfel, se poate observa că  $\tau$ , pentru inducții magnetice între 0,3 și 1,3 T (valori ce se pot lua în considerare la FBP-uri) scade sensibil cu creșterea întrefierului  $\delta$ . De exemplu, în cazul inducțiilor mari, de 1,1 T,  $\tau = 1,15$  la  $\delta = 0,5$ ;  $\tau = 0,8$  la  $\delta = 1$  și  $\tau = 0,65$  la  $\delta = 1,5$  mm.

Prin elaborarea unor noi tipuri de pulberi feromagnetice, având diferite mărimi și forme ale granulelor, în fiecare caz în parte e necesar să se determine principalii parametri de calcul ale acestora, iar în proiectare, pentru permeabi-

litatea magnetică să se adopte valori mai mici decât cele experimentale, pentru a avea o anumită rezervă.

### 3.2. Determinarea prin calcul a principalilor parametri ai FEP

La determinarea analitică a principalilor parametri ai FEP am făcut uz de o serie de lucrări de specialitate apărute în țară și străinătate referitoare la proiectarea unor cuplaje electromagnetice cu pulbere [17, 20, 22, 42, 53, 57, 65, 72, 73, ...], încercând să stabilim o metodică de proiectare, proiectând și executând două prototipuri experimentale, care, au dat rezultate.

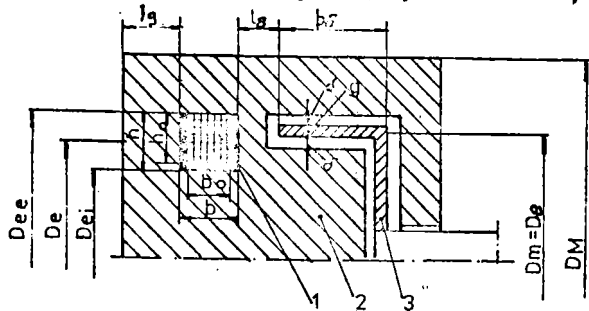


Fig. 27. Precizarea unor notații referitoare la dimensiunile geometrice ale FEP: 1-bobină de excitație; 2-stator; 3-rotor.

Pentru înțelegerea notațiilor utilizate, în figura 27 am precizat unele dimensiuni geometrice care vor fi luate în considerare în cadrul acestui paragraf.

În metodică prezentată, unitățile de măsură sunt date în SI, precizând unele modificări ce a-

par, referitoare la unitatea de măsură. Am utilizat următoarele notații:

- $U_e$  - tensiunea de alimentare a bobinei de excitație, V;
- $I_e$  - curentul de excitație, A;
- $P_e$  - puterea consumată în bobina de excitație, W;
- $M_n$  - cuplul de frînare nominal, la valoarea nominală a curentului de excitație, daN.m;
- $M_r$  - cuplul de frînare remanent la  $I_e = 0$  și viteza de rotație nominală, daN.m;
- $M_{max}$  - cuplul de frînare maxim la  $I_e = I_{emax}$ , daN.m;
- $n_n$  - viteza de rotație nominală, rot/min;
- $\mu$  - permeabilitatea magnetică a circuitului magnetic, H/m;
- $\mu_\delta$  - permeabilitatea magnetică a materialului de umplere în întrefier, H/m;
- $B_i$  - inducția în circuitul magnetic, T;
- $B_\delta$  - inducția medie (teoretică) în întrefier, T;
- $U_{...}$  - tensiunea magnetotoare a bobinei de excitație

- $\delta$  - valoarea intrefierului în direcția fluxului magnetic, m;
- $b_{\delta}$  - lungimea intrefierului, m;
- $D_m$  - diametrul mediu al intrefierului, m;
- $D_e$  - diametrul mediu al bobinei de excitație, m;
- $d$  - diametrul conductorului de bobinaj neizolat, mm;
- $d_{iz}$  - diametrul conductorului de bobinaj cu izolație, mm;
- $L_e$  - inductanța bobinei de excitație, H;
- $R_e$  - rezistența electrică a bobinei de excitație,  $\Omega$ ;
- $\rho_{20^{\circ}\text{C}}$  - rezistivitatea materialului conductorului de bobinaj la  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $\Omega \cdot \text{m}^{-1}$ ;
- $w_0$  - numărul de spire teoretic ce încap în fereastra bobinei;
- $w$  - numărul real de spire al bobinei;
- $k_{uf}$  - coeficient de umplere al ferestrei bobinei;
- $b_{oxh_0}$  - dimensiunile interioare ale ferestrei bobinei,  $\text{mm}^2$ ;
- $b_{xh}$  - dimensiunile exterioare ale ferestrei bobinei,  $\text{mm}^2$ ;
- $H$  - intensitatea câmpului magnetic, A/m;
- $\Phi$  - fluxul magnetic, Wb;
- $l_i$  - lungimile porțiunilor circuitului magnetic, m;
- $S_i$  - secțiunile porțiunilor circuitului magnetic, perpendiculare pe direcția fluxului magnetic,  $\text{m}^2$ ;
- $T$  - efortul specific de rezistență la deplasare, în intrefier,  $\text{daN/cm}^2$ ;
- $k_{\delta} = b_{\delta}/D_m$  - coeficient ce caracterizează dimensiunile geometrice ale dispozitivului;
- $k_m$  - coeficient ce ține cont de numărul de intrefieruri;
- $m$  - numărul de intrefieruri;
- $k_u$  - coeficient de umplere volumetrică a amestecului de umplere cu fier;
- $k_p$  - coeficient ce depinde de compoziția pulberii;
- $k_v$  - coeficient ce depinde de viteza periferică a rotorului în intrefier;
- $k_o$  - coeficient ce depinde de densitatea materialului de umplere și dimensiunile intrefierului;
- $\beta$  - exponent ce depinde de densitatea materialului de umplere și dimensiunile intrefierului, luat în calcul pentru determinarea inducției în intrefier.
- Determinarea preliminară a principalilor parametri ai FEP se face plecând de la valoarea nominală a cuplului de frinare,

care este dat de relația/72/:

$$M_n = \frac{\pi \cdot D_m^3}{200} \cdot k_g \cdot m \cdot \mathcal{T}. \quad (31)$$

Ținând cont de faptul că am notat  $k_g = b_g / D_m$  avem și,

$$M_n = \frac{\pi \cdot D_m^2}{200} \cdot b_g \cdot m \cdot \mathcal{T}. \quad (32)$$

Relațiile de calcul (31) și (32) sînt valabile în cazul în care nu se ține cont de numărul de întrefieruri plasate perpendicular pe direcția liniilor de flux magnetic.

Deoarece, numărul de întrefieruri influențează asupra densității materialului de umplere, în cazul în care acestea sînt amplasate pe raze diferite (în funcție de alegerea variantei constructive), momentul nominal de frinare se va corecta printr-un coeficient  $k_m$  și relația (32) devine:

$$M_n = \frac{\pi \cdot D_m^2}{200} \cdot b_g \cdot m \cdot k_m \cdot \mathcal{T}. \quad (33)$$

În relațiile (31 - 33), cuplul nominal  $M_n$  va rezulta în daN.cm, dacă celelalte mărimi ce intervin se exprimă astfel:  $D_m$  în cm.,  $b_g$  în cm.,  $\mathcal{T}$  în daN/cm<sup>2</sup>.

În cazul în care calculăm pe  $M_n$  în daN.m, relația (33) devine:

$$M_n = \frac{\pi \cdot D_m^2}{2} \cdot b_g \cdot m \cdot k_m \cdot \mathcal{T}, \quad (33')$$

$D_m$  fiind dat în m,  $b_g$  în m și  $\mathcal{T}$  în daN/m<sup>2</sup>.

Valorile coeficientului  $k_m$ , în funcție de numărul de întrefieruri plasate pe raze diferite se alege în conformitate cu tabelul 6 /22/.

TABELUL 6: Valorile coeficientului  $k_m$  în funcție de  $m$

$m$	1	2	4	6	8
$k_m$	1	0,95	0,9	0,8	0,6-0,7

Dacă întrefierurile se găsesc amplasate pe raze apropiate, această corecție nu mai este necesară, deoarece influența sa asupra momentului de frinare e nesemnificativă.

Din consultarea literaturii referitoare la FEP, variantele uzuale executate se realizează cu  $m = 1$ ;  $m = 2$  (pentru cupluri mici și mijlocii) și cu  $m = 4$  (pentru cupluri mari), ceea ce ne duce la concluzia că valoarea lui  $k_m$  este aproape de unitate.

În cazul în care FEP nu sînt prevăzute cu sistem de răci-

re suplimentar și funcționează în regim de alunecare de lungă durată, ținând cont de încălzirea acestora care va duce la modificarea proprietăților magnetice ale materialelor din care se confecționează circuitul magnetic, la scăderea permeabilității magnetice a amestecului de umplere /43/, la modificarea parametrilor electrici ai bobinei de excitație și scăderea valorii cuplului de frinare (ceea ce s-a verificat și experimental în urma încercărilor din capitolul 5), considerăm că e necesar să se adopte un coeficient de siguranță de 1,2 - 1,5 la valoarea cuplului nominal, în funcție de destinația dispozitivului proiectat.

În cazul în care, din motive tehnologice, se adoptă constructiv și diametrul  $D_m$  al frinei, cu relațiile (31 - 33) se va determina valoarea efortului specific de rezistență la deplasare  $\tau$  care trebuie să se încadreze în limitele 0,3 - 1,5 daN/cm<sup>2</sup> /53/, conform figurii 26, avînd valori mai reduse cînd întrefierul are valori mai mari.

Efortul specific de rezistență la deplasare  $\tau$  se poate exprima în funcție de inducția în întrefier  $B_f$  cu relația /22/, /57/:

$$\tau = k_p \cdot k_v \cdot k_o \cdot B_f^\beta, \quad (34)$$

unde:  $k_p$  este un coeficient ce depinde de compoziția pulberii la diferite valori ale coeficientului de umplere volumetrică cu fier  $k_u$  a amestecului de umplere;  $k_v$  - coeficient ce depinde de viteza periferică a rotorului;  $k_o$  - coeficient ce depinde de densitatea amestecului de umplere la diferiți  $k_u$  și de dimensiunile întrefierului;  $\beta$  - exponent ce depinde de densitatea amestecului de umplere și dimensiunile întrefierului.

Determinarea acestor coeficienți se face astfel:

- $k_p$  din tabelul 7 /42, 77/;
- $k_v$  depinde de viteza periferică a rotorului dată de:

$$v = \frac{\pi \cdot D_m \cdot n}{60} \quad (35)$$

și de valoarea întrefierului după curbele din figura 28 /22/;

- $k_o$  depinde de densitatea materialului de umplere și dimensiunile întrefierului, după curbele din figura 29 /22/;

- $\beta$  depinde de densitatea materialului de umplere și dimensiunile întrefierului, după curbele din figura 29.

Cunoscînd valoarea efortului specific de rezistență la deplasare  $\tau$ , din relația (34) se determină valoarea medie a inducției magnetice în întrefier  $B_f$  cu relația:

$$B_{\delta} = \frac{\tau}{k_p \cdot k_v \cdot k_o} \quad (36)$$

În raport cu numărul întrefierurilor și amplasarea lor, conform variantei constructive adoptate, inducțiile în întrefier pot avea valori diferite dacă razele de așezare ale acestora sînt îndepărtate și diferențe nesemnificative la raze apropiate.

**TABELUL 7:** Valorile lui  $k_u$  în funcție de compoziția pulberii și  $k_u^p/42, 77\%$ .

Compoziția pulberii feromagnetice	$k_u$	$k_p$
Fier carbonil 6 - 12 $\mu$ m	1	1,4
Fier carbonil și oxid de zinc	0,5 - 0,65	1,1
Fier carbonil și oxid de magneziu	0,5 - 0,65	1,15
Fier carbonil și sticlă fin dispersată	0,5 - 0,65	1,2
Pulbere de oțel 25 - 40 $\mu$ m și oxid de zinc	0,5 - 0,65	1,2

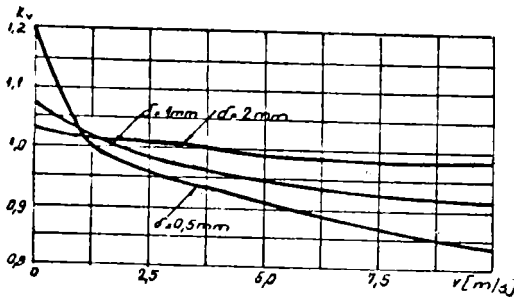


Fig. 28. Variația lui  $k_v$  în funcție de  $v$ , la valori diferite ale lui  $\delta$ .

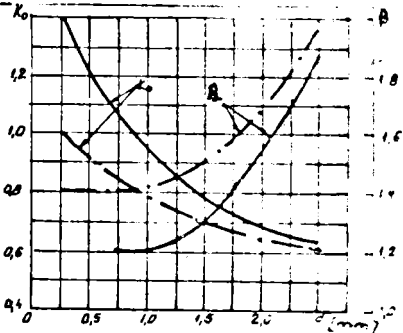


Fig. 29. Variația lui  $k_u$  și  $\beta$  în funcție de  $\delta$ , la diferite  $k_u$ .

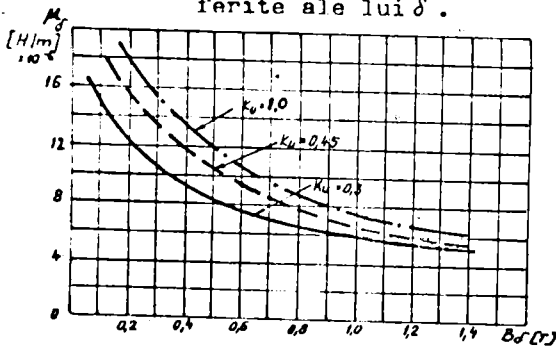


Fig. 30. Variația permeabilității magnetice  $M_f$  cu inducția la diferiți  $k_u$

Precizăm că, prin coeficient de umplere volumetrică cu fier al materialului de umplere  $k_u$  se înțelege cantitatea de fier pur existent în pulberea feromagnetică și, în funcție de calitatea acesteia, are valori cuprinse între 0,3 și 0,65 (cele mai uzuale fiind 0,3 și 0,45), restul pînă la unitate revenind altor materiale și substanțe separatoare, raportarea făcîndu-se la cantitatea materialului de umplere utilizată.



Cu cît valoarea coeficientului de umplere  $k_u$  este mai mare, cu atît calitățile pulberii sînt mai bune, adică pentru aceeași valoare a inducției magnetice,  $M_f$  crește la valori mai mari ale lui  $k_u$ , după cum rezultă din figura 30/42/.

Pentru calculul tensiunii magnetotoare  $U_{mm} = w \cdot I_e$ , necesară pentru a asigura inducția magnetică  $B_g$  în întrefier, se poate utiliza următoarea relație de calcul /77/:

$$U_{mm} = w \cdot I_e = m \cdot \delta \cdot \frac{B_g}{\mu_f} \cdot (1 + \frac{\alpha}{m \cdot \delta}) \quad (37)$$

unde  $\alpha$  este un coeficient ce depinde de inducția magnetică în întrefier  $B_g$  și dimensiunile întrefierului, pentru diverse valori ale coeficientului  $k_v$ , în conformitate cu figura 31 /22/.

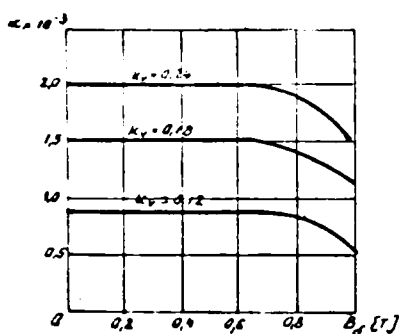


Fig.31. Variația lui  $\alpha$  în funcție de  $B_g$  și  $k_v$ .

pentru  $q$ , atunci  $d$  rezultă în m. Dacă se dă  $q$  în  $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ,  $d$  va rezulta în mm.

Alegînd, conform STAS diametrul conductorului izolat  $d_{iz}$ , impunînd dimensiunile interioare ale carcasi bobinei  $b_o \times h_o$ , dacă vom nota  $k_1 = b_o/d_{iz}$  și  $k_2 = h_o/d_{iz}$ , numărul de spire teoretic al bobinei va fi  $w_o = k_1 \cdot k_2$ . Ținînd cont că fereastra bobinei nu poate fi umplută uniform, adoptînd un coeficient de umplere al ferestrei  $k_{uf} = 0,6 - 0,8$ , numărul real de spire al bobinei de excitație va fi:  $w = k_{uf} \cdot k_1 \cdot k_2$ .

Preczăm că, adoptarea acestei metodici de calcul, impune determinarea lui  $U_{mm}$  cu relația (37) și introducerea acestei valori în locul termenului  $w \cdot I_e$  în relația (38).

Cunoscînd numărul real de spire, valoarea curentului de excitație necesar va fi dat de  $I_e = U_{mm}/w$  sau de relația:

$$I_e = U_e \cdot d^2 / 4 \cdot w \cdot D_e \quad (39)$$

Asigurarea tensiunii magnetotoare necesară impune valoarea diametrului conductorului de bobinaj al înfășurării, diametru dat de relația:

$$d = \sqrt[3]{\frac{w \cdot I_e \cdot D_e \cdot q}{U_e}} \quad (38)$$

unde  $D_e$  este diametrul mediu al bobinei de excitație, ales constructiv.

Dacă în relația (38) unitățile de măsură sînt: A pentru  $I_e$ , V pentru  $U_e$ , m pentru  $D_e$  și  $\Omega/\text{m}$

Densitatea de curent  $J$  va fi:

$$J = \frac{4 \cdot I_e}{\pi \cdot d^2} \quad (40)$$

ale cărei valori recomandate sînt următoarele: 2,5 - 5 A/mm<sup>2</sup> pentru conductoarele de bobinaj cu diametrul mai mare de 0,5 mm și 6 - 8 A/mm<sup>2</sup> pentru conductoare cu diametre între 0,05 - 0,5 mm /42/.

Pentru determinarea constantei de timp electrice  $T_e$ , e necesar să determinăm valoarea rezistenței electrice și inductanței bobinei de excitație, știind că  $T_e = L_e/R_e$ .

Valoarea rezistenței electrice se determină cu:

$$R_e = \rho_{20^\circ\text{C}} \cdot \frac{4 \cdot D_e \cdot w}{d^2}, \quad (41)$$

iar inductanța  $L_e$  cu relația:

$$L_e = w \cdot \frac{\Phi_\delta}{I_e}. \quad (42)$$

În relația (42)  $\Phi_\delta$  reprezintă valoarea fluxului magnetic în întrefier, luînd în calcul un coeficient de scăpări  $k_\delta$ , cu valori între 1,1 - 1,5 /81/ ce ține cont de fluxurile de dispersie. În acest fel,  $\Phi_\delta = k_\delta \cdot B_\delta \cdot S_\delta = k_\delta \cdot \pi \cdot D_m \cdot b_\delta \cdot B_\delta$ .

Analizînd relațiile de calcul (41, 42), valoarea constantei de timp  $T_e$  poate fi calculată cu relația:

$$T_e = \frac{\pi \cdot D_m \cdot b_\delta \cdot B_\delta \cdot d^2 \cdot k_\delta}{4 \cdot \rho_{20^\circ\text{C}} \cdot I_e \cdot D_e}. \quad (43)$$

Determinarea principalilor parametri ai FEP se poate face în următoarea ordine:

a. Impunînd valoarea efortului specific de rezistență la deplasare  $\mathcal{T}$  și cunoscînd valoarea momentului nominal de rîndare, adoptînd varianta constructivă, din formula (33) se determină diametrul mediu al întrefierului  $D_m$ . Valoarea lui  $\mathcal{T}$  se va alege în limitele 0,3 - 1,4 în raport cu mărimea întrefierului, din figura 26 /53/, valorile mai mari adoptîndu-se pentru întrefieruri reduse. Acest lucru se impune pe motivul că, practic,  $\mathcal{T}$  reprezintă un efort de forfecare al "legăturilor magnetice" între rotorul și statorul FEP realizate prin intermediul pulberii feromagnetice. Cu cît lungimea acestor "legături magnetice" este mai mare (întrefier mai mare) ruperea lor se va produce la un efort mai mic, reducînd în acest fel valoarea cuplului transmis.

Valoarea coeficientului  $k_g$  se alege orientativ după tabelul 5 cu precizarea că, în funcție de varianta constructivă, încadrarea în limitele indicate nu este posibilă întotdeauna. Valorile orientative sînt indicate pentru dispozitive executate în variantele constructive din figura 25 c) și d). De exemplu, la frinele executate de firma Lenze /90/ în varianta din figura 25 b) și la frinele firmei Vibrometer în aceeași variantă /94/, acest coeficient atinge valori apropiate de unitate. De asemenea, la frinele executate de firma Jaeger /89/, în varianta din figura 25 b), valorile lui  $k_g$  se găsesc în limitele 0,5 - 0,8.

b. Dacă se impune și diametrul mediu  $D_m$ , din motive de natură funcțională și de amplasare a dispozitivului, cunoscînd valoarea cuplului nominal de transmis, atunci din relațiile (31 - 33) se determină valoarea efortului specific de rezistență la deplasare  $\mathcal{F}$ , care trebuie să se încadreze în limitele indicate.

c. Grosimea întrefierului  $\delta$  este de obicei limitată în intervalul 0,5 - 3 mm, în funcție de posibilitățile de realizare tehnologică, adoptîndu-se valori mai mici pentru cupluri reduse, iar numărul de întrefieruri  $m$  se adoptă în funcție de varianta constructivă aleasă.

Pentru reducerea greutateii dispozitivului, diametrul exterior  $D_e$ , al acestuia, se poate alege în limitele date de relația /22/:

$$D_M = \sqrt{D_m(D_m + 4 \cdot b_g)} + \sqrt{D_m(1,5 \cdot D_m + 4 \cdot b_g)} \quad (44)$$

valabilă în cazurile în care  $D_e \approx D_m$ .

Considerăm că, încadrarea în limitele date de această relație nu este obligatorie, deoarece geometria circuitului magnetic intervine la calculul tensiunii magnetotoare  $U_{mm}$  necesară creerii inducției magnetice în întrefier  $B_g$ .

d. Cu ajutorul formulei (36) se determină valoarea inducției magnetice  $B_g$  în întrefier și valoarea tensiunii magnetotoare  $U_{mm} = w \cdot I_e$  cu formula (37).

e. Se determină numărul de spire al bobinei de excitație  $w$  alegînd constructiv dimensiunile ferestrei și valorile curentului de excitație  $I_e$  și densitatea de curent  $J$  cu (39, 40).

f. Din relațiile (41, 42, 43) se determină rezistența electrică și inductanța bobinei, precum și constanta de timp electrică  $T_e$ .

g. Calculul circuitului magnetic prezintă greutatea deo-

sebite și în majoritatea cazurilor dau doar valori orientative care trebuie să fie perfectate cu datele practice și cele experimentale.

La calculul circuitului magnetic al FEP apar probleme deosebite datorită valorilor necunoscute ale fluxurilor de dispersie din frână și forțelor de frecare în stratul de pulbere care depind de inducția magnetică și densitatea materialului de umplere.

Totuși, în literatură [14, 16, 45, 50, 61, 63, 66, 69, 79, 81], ținând cont de condițiile concrete, există calcule aplicabile. Determinarea tensiunii magnetomotoare totale se realizează împărțind circuitul magnetic pe porțiuni și vom avea:

$$U_{mm} = \sum H_i \cdot l_i \quad (45)$$

unde  $H_i$  reprezintă intensitatea cîmpului magnetic în porțiunea  $i$ , iar  $l_i$  este lungimea porțiunii  $i$  din circuitul magnetic.

Determinarea exactă a tensiunii magnetomotoare nu este întotdeauna posibilă, deoarece, apar cazuri în care nu pentru toate materialele ce formează circuitul magnetic au fost determinate curbele de magnetizare.

În continuare, vom încerca să redăm metoda de lucru, pe baza unor exemple concrete, care au fost supuse cercetărilor și experimentărilor.

Deoarece, la proiectarea modelului experimental de 0,1 daN.m, în faza inițială am adoptat un coeficient de siguranță mare (4) la valoarea cuplului, rezultatele experimentale au fost mult eronate. Am procedat la refacerea calculului cu un coeficient de siguranță 1,5, rezultatele experimentale fiind mult mai aproape de valoarea asupra cuplului impusă prin proiect.

### 3.3. Proiectarea optimă a FEP

În funcție de metoda de calcul a FEP, prezentată și propusă în paragraful 3.2., am procedat la proiectarea a două modele experimentale (capitolul 4) și efectuarea de încercări experimentale (capitolul 5) în scopul verificării metodei propuse și stabilirea unor valori optime pentru diverși coeficienți și elemente constructive ce se iau în considerare la calculul FEP.

În urma încercărilor experimentale și analiza acestora ne pot preciza următoarele:

a. Valoarea cuplului maxim de frinare, pentru același curent de excitație se obține la valori ale întrefierului mai mari

se. Astfel, pentru dispozitivul de 0,1 daN.m la  $I_e = 100$  mA valoarea cuplului transmis este de 0,135 daN.m pentru  $\delta = 0,6$  mm, 0,13 daN.m pentru  $\delta = 0,8$  mm și 0,115 daN.m pentru  $\delta = 1$  mm la același coeficient de umplere volumetrică cu pulbere a întrefierului  $k_{uv} = 0,8$ . Pentru dispozitivul de 20 daN.m la  $k_{uv} = 0,9$  și curent de excitație de 0,5 A, cuplul transmis este de 19 daN.m pentru  $\delta = 1$  mm și 18,6 daN.m pentru  $\delta = 1,5$  mm.

În condiții de execuție foarte precise, pentru a păstra paralelismul între rotor și stator, valorile reduse ale întrefierului asigură un cuplu de frinare mai mare. Dar, în urma efectuării încercărilor, am constatat că la  $\delta = 0,6$  mm în cazul frinei de 0,1 daN.m și  $\delta = 1$  mm la frîna de 20 daN.m, valoarea cuplului rezidual ( $I_e = 0$ ) avea valori mari (0,05, respectiv 0,8 daN.m), probabil și din cauza unor frecări de natură mecanică, optînd pentru un întrefier de 0,8 mm, respectiv 1,5 mm, realizabile tehnologic și cu rezultate experimentale bune în cazul utilizării pulberii din import.

Cu cît valoarea întrefierului este mai mare, valoarea cuplului de frinare scade sensibil, aceasta pe motivul că "legăturile magnetice" sînt mai reduse, efortul specific de rezistență la deplasare  $\mathcal{T}$  scade, ceea ce duce la scăderea inducției magnetice în întrefier.

b. Compoziția pulberii feromagnetice influențează sensibil asupra cuplului de frinare transmis, în sensul că reducerea procentului de fier pur scade proprietățile sale magnetice /22, 77/. Necunoscînd valorile coeficientului de umplere volumetrică cu fier  $k_u$  pentru tipurile de pulbere utilizată, din încercările efectuate cu pulbere din import și cele cu pulbere preparată în laborator, se observă o diferență semnificativă între valorile cuplului transmis. Astfel, la frîna de 0,1 daN.m, pentru  $k_{uv} = 0,8$ , la  $I_e = 100$  mA, valoarea cuplului transmis este de 0,135 daN.m, iar la aceeași parametrii, în cazul pulberii indigene, valoarea cuplului este de numai 0,085 daN.m. De asemenea, creșterea în volum a materialului de separare din amestecul de umplere, duce la scăderea cuplului transmis. Efectuarea unor încercări prin modificarea raportului material separator/pulbere de la 1/40 la 1/20, în cazul pulberii indigene, a dus la scăderea cuplului în condițiile amintite de la 0,085 la 0,06 daN.m.

c. Volumul de material de umplere din întrefier are va-

lori optime aproape de umplerea în exces a întrefierului. Experimental am stabilit că valoarea lui  $k_{UV} = 0,8$  pentru frâna de 0,1 daN.m și  $k_{UV} = 0,9$  pentru frâna de 20 daN.m. Precizăm că, la mărirea acestui coeficient (valoarea 1), cuplul rezidual al dispozitivelor are valori ridicate și, mai mult, din cauza frecărilor mecanice între stratul de pulbere, rotor și stator, se produce o încălzire excesivă a frinelor.

d. Valoarea curentului de excitație  $I_e$ , luată în calcule la proiectarea modelelor experimentale a dat rezultate bune, existînd o anumită rezervă, dar, creșterea sa duce la saturația circuitului magnetic și a pulberii, precum și la o încălzire mai accentuată a dispozitivelor.

e. Viteza de rotație limită (la care cuplul de frînare începe să scadă) este mai redusă pentru întrefieruri mai mari, rușterea "legăturilor magnetice" făcîndu-se la viteze de rotație mai mari cu cît distanța pe care se realizează (întrefierul) este mai mică.

f. Adoptarea unui coeficient de siguranță asupra valorii cuplului transmis, pe care îl propun între 1,1 și 1,5, este necesară pe motivul că la calculul circuitului magnetic e foarte greu să luăm în considerare și fluxurile de dispersie ce apar pe anumite porțiuni. Din rezultatele experimentale rezultă că dacă, la frâna de 0,1 daN.m, am adoptat un coeficient de siguranță de 1,5, valoarea cuplului optim este de 0,135 daN.m la  $\delta = 0,8$  mm, pe cînd, la frâna de 20 daN.m, unde nu am luat în considerare acest coeficient, cuplul optim este de 18,6 daN.m pentru  $\delta = 1,5$  mm. Raportul dintre cuplul prevăzut prin proiectare și cuplul real, în al doilea caz, este de 1,05, ceea ce demonstrează necesitatea adoptării unui coeficient de siguranță, aceasta pentru a nu fi nevoiți să modificăm geometria circuitului magnetic în scopul modificării tensiunii magnetomotoare.

## CAPITOLUL 4

### DIMENSIONAREA A DOUA MODELE EXPERIMENTALE DE FEP

Pentru exemplificarea aplicării metodei de proiectare propusă în capitolul 3, am proiectat două modele experimentale, unul pentru cuplu de frinare de 0,1 daN.m, cu posibilitate de experimentare în laborator și unul pentru un cuplu de 20 daN.m, necesar la încercarea pe timp scurt a reductoarelor planetare în cadrul ștrandului de probe de la I.M.M.U.M Baia Mare /50/.

#### 4.1. Proiectarea unei FEP cu $M_n = 0,1$ daN.m.

Pentru proiectarea frinei am considerat următoarele date inițiale:

- momentul nominal de frinare  $M_n = 0,1$  daN.m;
- viteza nominală de rotație  $n_n = 1500$  rot/min;
- tensiunea de alimentare a bobinei de excitație  $U_e = 24$  V, curent continuu.

Ținând cont de faptul că viteza de rotație nominală propusă are valoare ridicată, am adoptat varianta constructivă de frână cu rotor cilindric cu pereți subțiri, de mică inerție, cu o singură bobină de excitație. Varianta constructivă este redată în figura 32, alegând întrefierurile  $\delta_1 = \delta_2 = \delta = 0,8$  mm,  $m = 2$ , lungimea activă a rotorului în întrefier fiind  $b_g = 8$  mm.

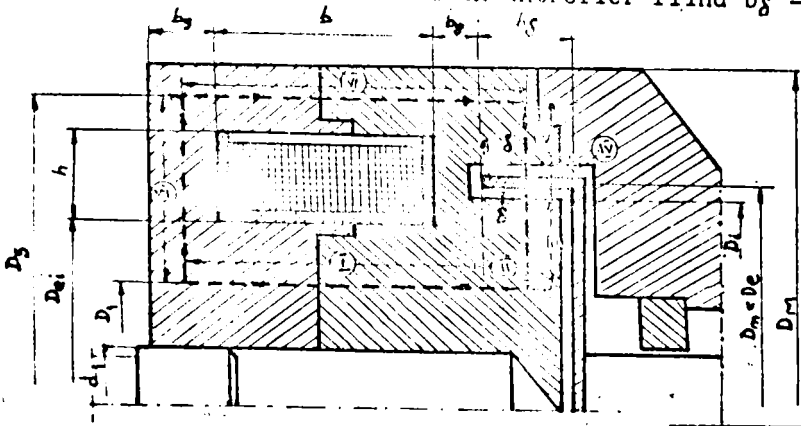


Fig.32. Secțiune prin FEP de 0,1 daN.m (variantă constructivă și indicarea porțiunilor pentru calculul circuitului magnetic.

#### 4.1.1. Calculul principalilor parametrii

Adoptînd valoarea efortului specific de rezistență la deplasare  $\tau = 0,4 \text{ daN/cm}^2$ , din relația (32), cu un coeficient de siguranță egal cu 1,5 pentru cuplu de frinare, vom avea:

$$D_m = \sqrt{\frac{200 \cdot M_n \cdot 1,5}{\pi \cdot b \cdot m \cdot \tau}} = \sqrt{\frac{1,5 \cdot 200 \cdot 0,1}{3,14 \cdot 0,8 \cdot 2 \cdot 0,4}} = 3,96 \text{ cm.}$$

Se adoptă diametrul mediu la nivelul întrefierurilor la valoarea  $D_m = 40 \text{ mm} = 0,4 \text{ cm} = 0,04 \text{ m}$ . În acest fel, raportul  $b_g/D_m = 0,2$ , încadrîndu-se în valorile orientative date de tabelul 5. Deoarece cele două întrefieruri sînt amplasate pe raze apropiate, nu sîm mai ținut cont de  $k_m$ .

Viteza periferică a rotorului, dată de relația (35) este:

$$v = \frac{\pi \cdot D_m \cdot n_n}{60} = \frac{3,14 \cdot 0,04 \cdot 1500}{60} = 3,14 \text{ m/s.}$$

Din figura 28 rezultă  $k_v = 0,98$ .

Cu ajutorul relației (34), alegînd după tabelul 7  $k_p = 1,2$  (pentru pulbere din fier carbonil și aticilă fin dispersată),  $k_g = 0,8$ ,  $\beta = 1,4$  din figura 29, calculăm valoarea inducției magnetice  $B_g$  în întrefier și avem:

$$B_g^{1,4} = \frac{\tau}{k_p \cdot k_v \cdot k_o} = \frac{0,4}{1,2 \cdot 0,98 \cdot 0,8} = 0,425.$$

Rezultă  $B_g = 0,543 \text{ T}$ .

Adoptăm  $B_g = 0,55 \text{ T} = 5500 \text{ Gs}$ .

Tensiunea magnetotoare necesară creerii inducției magnetice  $B_g$  în întrefier, considerînd  $\mu_g = 0,8 \cdot 10^{-5} \text{ H/m}$ ,  $\alpha = 1,85 \cdot 10^{-3}$  (după figura 31), se determină cu relația (37):

$$U_{mm} = m \cdot \delta \cdot \frac{B_g}{\mu_g} \cdot \left(1 + \frac{\alpha}{\pi \cdot \delta}\right) = \frac{2 \cdot 0,008 \cdot 0,55 \cdot 2,15}{0,8 \cdot 10^{-5}} = 236 \text{ A.}$$

spire, urmînd să lucrăm în continuare cu 240 A.sp.

Pentru un diametru mediu al bobinei de excitație ales constructiv pentru această variantă  $D_e = D_m = 0,04 \text{ m}$ , utilizînd conductor de cupru cu  $\rho_{20^\circ\text{C}} = 0,0175 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ , relația (38) ne va da diametrul conductorului de bobinaj  $d$ , adică:

$$d = 2 \cdot \sqrt{\frac{U_{mm} \cdot D_e \cdot f}{U_g}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{240 \cdot 0,04 \cdot 0,0175}{24}} = 0,16 \text{ mm.}$$

Din /58/ se alege conductor de bobinaj din cupru, cu izolație de email tip EM 1, cu  $d = 0,16 \text{ mm}$  și  $d_{iz} = 0,18 \text{ mm}$ .

Alegînd constructiv dimensiunile interioare ale car-



bobinei  $h_0 = 6$  mm,  $b_0 = 15$  mm, cu rezerva unui coeficient de umplere al ferestrei  $k_{uf} = 0,7$ , vom obține:

$$k_1 = \frac{6}{0,13} = 38,8; \quad k_2 = \frac{15}{0,18} = 83,3.$$

Numărul teoretic de spire al bobinei va fi dat de:

$$w_0 = k_1 \cdot k_2 = 38,8 \cdot 83,3 = 3233 \text{ spire,}$$

iar numărul real de spire ce încap în fereastră va fi:

$$w = k_{uf} \cdot w_0 = 0,7 \cdot 3233 = 2263 \text{ spire. Adopt } w = 2270 \text{ sp.}$$

Curentul de excitație al frânei, dat de relația (39) va fi:

$$I_e = \frac{U_e \cdot d^2}{4 \cdot w \cdot D_e \cdot \varphi} = \frac{24 \cdot 0,16}{4 \cdot 2270 \cdot 0,04 \cdot 0,0175} = 0,096 = 0,1 \text{ A.}$$

Valoarea densității de curent calculată cu relația (40) ne va da:

$$J = \frac{4 \cdot I_e}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 0,1}{3,14 \cdot 0,16^2} = 4,97 \text{ A/mm}^2,$$

valoare admisibilă deoarece pentru conductoare cu diametru sub 0,2 mm,  $J$  este cuprins între 6 - 8 A/mm<sup>2</sup>.

Rezistența electrică a bobinei de excitație (41) este:

$$R_e = \frac{4 \cdot D_e \cdot w}{d^2} \cdot \rho_{20^\circ\text{C}} = \frac{4 \cdot 0,04 \cdot 2270}{0,16^2} \cdot 0,0175 = 248 \Omega.$$

Puterea de comandă a dispozitivului va fi:

$$P_e = R_e \cdot I_e^2 = 248 \cdot 0,1^2 = 2,48 \text{ W.}$$

Pentru determinarea constantei de timp electrică, valoarea inductanței e dată de relația (42). Cunoscind  $b_g = 0,8$  cm,  $S_g = \pi \cdot D_e \cdot b_g = 3,14 \cdot 0,8 \cdot 0,4 = 10 \text{ cm}^2 = 10^{-3} \text{ m}^2$ , ținind cont de fluxurile de scăpării prin  $k_g = 1,5$ , valoarea fluxului în întregul va fi:

$$\Phi_g = 1,5 \cdot B_g \cdot S_g = 1,5 \cdot 0,55 \cdot 10^{-3} = 8,25 \cdot 10^{-4} \text{ Wb.}$$

Cu aceste valori, inductanța  $L_e$  va fi:

$$L_e = w \cdot \frac{\Phi_g}{I_e} = 2270 \cdot \frac{8,25 \cdot 10^{-4}}{0,1} = 18,72 \text{ H,}$$

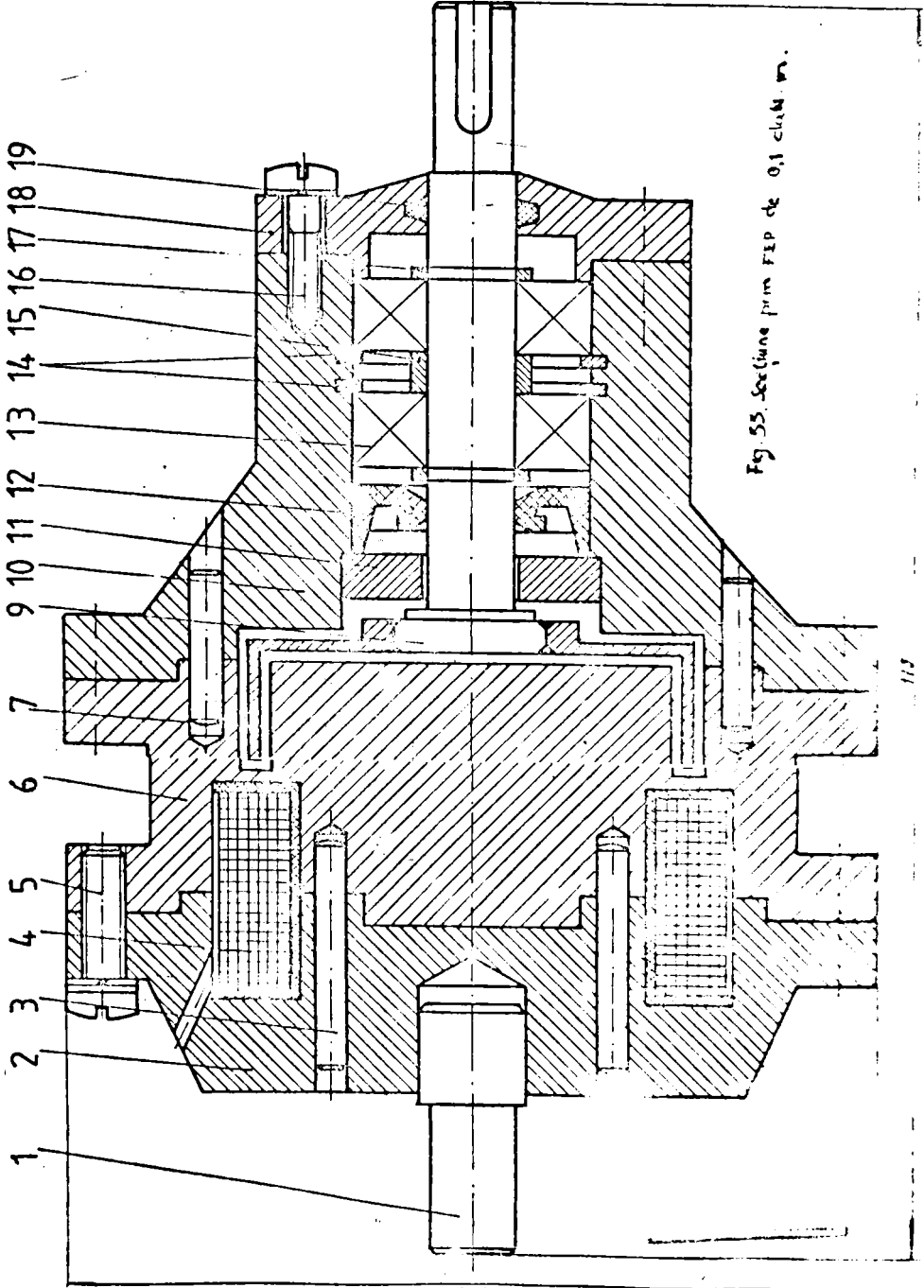
iar constanta de timp electrică  $T_e = L_e / R_e = 18,72 / 248 = 0,075 \text{ s.}$

#### 4.1.2. Calculul circuitului magnetic.

Pentru efectuarea acestui calcul, circuitul magnetic a fost împărțit în 7 zone, conform figurii 32. Materialul din care se confecționează circuitul magnetic este oțel laminat de marca CL 52.2k, cu conținut garantat de carbon. S-a ales această variantă, deoarece executarea modelelor pentru turnare, la un prototip experimental, ar fi fost costisitoare, cu toate că oțelul

turnat și supus unui tratament de omogenizare prezintă proprietăți magnetice mai bune.

Frâna proiectată este reprezentată la scara 2:1 în figura 33 (secțiune longitudinală), unde: 1 - arbore de sprijin; 2 - sta-



tor I; 3 - știfturi conice; 4- bobină de excitație; 5- guruburi de fixare; 6 - stator II; 7 - rotor; 8 - pulbere feromagnetică; 9 - arbore rotor; 10 - flanșă lagăr; 11 - magnet permanent; 12 - ștering de etangare; 13 - rulmenți; 14 - inele de siguranță alezați; 15 - bușă de distanțare; 16 - șuruburi prindere capac lagăr; 17 - inele de siguranță arbore; 18 - capac lagăr; 19 - inel etangare din pislă.

În figura 34 este prezentată o vedere de ansamblu, iar în figura 35 sînt prezentate unele repere componente.

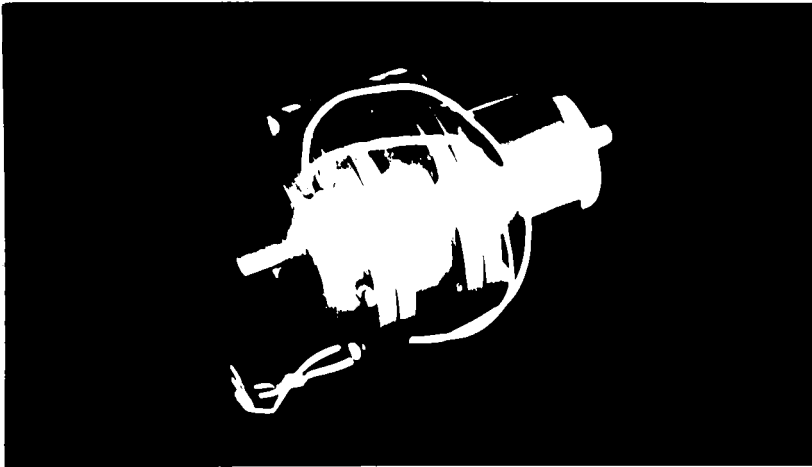


Fig.34. Vedere de ansamblu a frinei de 0,1 daN.m.

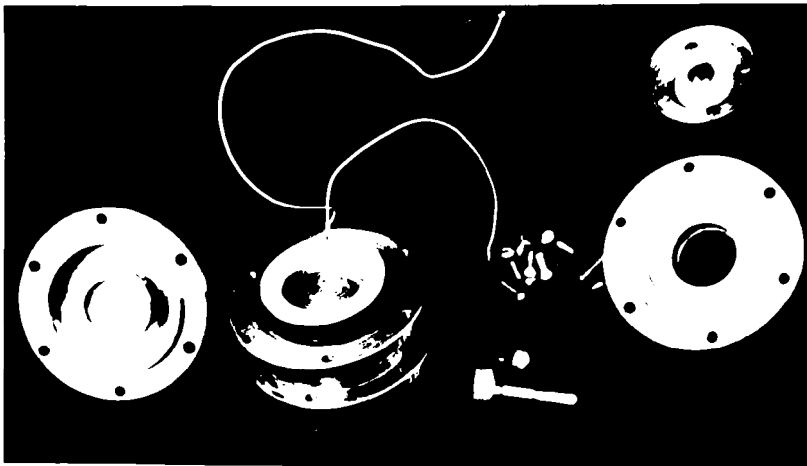


Fig.35. Repere componente ale frinei de 0,1 daN.m.

Pentru calculul circuitului magnetic am utilizat curbele de magnetizare /10, 13, 31, 40, 41, 59, 81, 82; 83/ale materia-

lelor din care se confecționează reșerle acestuia și am calculat tensiunea magnetomotoare pentru fiecare porțiune în parte, utilizând notațiile indicate în schema de principiu din figura 32.

### Porțiunea I

Suprafața circuitului magnetic este:

$$S_1 = \frac{\pi}{4}(D_{ei}^2 - d_1^2) = 3,14(0,032^2 - 0,01^2) = 7,25 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2.$$

Inducția magnetică pe acest sector va fi:

$$B_1 = \frac{\Phi_1}{S_1} = \frac{8,25 \cdot 10^{-4}}{7,25 \cdot 10^{-4}} = 1,2 \text{ T.}$$

Lungimea circuitului magnetic pe această porțiune este

$$l_1 = l_8 + b_8 + l_9/2 = (0,4 + 1,7 + 0,6) \cdot 10^{-2} = 2,7 \cdot 10^{-2} \text{ m},$$

iar din curba de magnetizare reprezentată în figura 35 /41/ rezultă  $H_1 = 15,8 \text{ A/cm}$ . Vom obține:

$$U_{mm1} = H_1 \cdot l_1 = 15,8 \cdot 2,7 = 41,5 \text{ A.sp.}$$

### Porțiunea II

Fluxul magnetic pe această porțiune de circuit este repartizat pe suprafața  $S_2$ , la un diametru mediu  $D_2$  dat de:

$$D_2 = \frac{D_i + d_1}{2} = \frac{0,038 + 0,01}{2} = 0,024 \text{ m.}$$

$$S_2 = \pi \cdot D_2 \cdot b_8 = 3,14 \cdot 0,024 \cdot 0,008 = 6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2.$$

$$B_2 = \Phi_1 / S_2 = 8,25 \cdot 10^{-4} / 6 \cdot 10^{-4} = 1,37 \text{ T.}$$

$$H_2 = 20 \text{ A/cm.}$$

$$U_{mm2} = H_2 \cdot b_8 = 20 \cdot 0,8 = 16 \text{ A.sp.}$$

### Porțiunea III

Pentru efectuarea unor calcule mai precise, această porțiune a fost împărțită în trei sectoare la următoarele diametre:

$$D_3^{\circ} = \frac{D_{ei} + d_1}{2} = \frac{0,032 + 0,01}{2} = 0,021 \text{ m,}$$

$$D_3^{\circ\circ} = \frac{D_3^{\circ} + D_i}{2} = \frac{0,021 + 0,038}{2} = 0,03 \text{ m și}$$

$$D_3^{\circ\circ\circ} = D_i = 0,038 \text{ m.}$$

Cele trei secțiuni ale sectoarelor vor fi:

$$S_3^{\circ} = \pi \cdot D_3^{\circ} \cdot b_8 = 3,14 \cdot 0,021 \cdot 0,8 = 5,27 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2,$$

$$S_3^{\circ\circ} = \pi \cdot D_3^{\circ\circ} \cdot b_8 = 3,14 \cdot 0,03 \cdot 0,008 = 7,53 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2,$$

$$S_3^{\circ\circ\circ} = \pi \cdot D_3^{\circ\circ\circ} \cdot b_8 = 3,14 \cdot 0,038 \cdot 0,008 = 9,55 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2.$$

Cu aceste date avem:

$$B_3 = \Phi_3 / S_3 = 8,25 \cdot 10^{-4} / 5,27 \cdot 10^{-4} = 1,56 \text{ T și } H_3 = 24 \text{ A/cm};$$

$$B_3' = \Phi_3 / S_3' = 8,25 \cdot 10^{-4} / 7,53 \cdot 10^{-4} = 1,09 \text{ T și } H_3' = 12 \text{ A/cm};$$

$$B_3'' = \Phi_3 / S_3'' = 8,25 \cdot 10^{-4} / 9,55 \cdot 10^{-4} = 0,86 \text{ T și } H_3'' = 8 \text{ A/cm}.$$

Lungimea medie a acestei porțiuni e dată de:

$$l_3 = \frac{D_3'' - D_3'}{2} = \frac{3,8 - 2,1}{2} = 0,85 \text{ cm}.$$

#### Porțiunea IV

În această porțiune de circuit se ia în calcul tensiunea magnetotoare în cele două întrefieruri și cea corespunzătoare grosimii  $g$  a rotorului. Avem:

$$U_{mm4} = U_{mm} + U_{mm4}' \text{ unde } S_4' = \pi \cdot (D_M + 2 \cdot g) = 10,24 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2,$$

$$B_4' = 8,25 \cdot 10^{-4} / 10,24 \cdot 10^{-4} = 0,8 \text{ T și } H_4' = 7,5 \text{ A/cm. Rezultă}$$

$$U_{mm4} = 110 + 7,5 = 117,5 \text{ A.sp.}$$

#### Porțiunea V

Suprafețele de calcul se vor împărți pe trei sectoare la care diametrele medii:

$$D_5' = D_i + 2(2\delta + g) = 0,0428 \text{ m},$$

$$D_5'' = D_5' + (D_M - D_5')/4 = 0,0471 \text{ m},$$

$$D_5''' = D_5' + (D_M - D_5')/2 = 0,0514 \text{ m}.$$

Cele trei secțiuni de calcul vor fi:

$$S_5' = \pi \cdot D_5' \cdot b_\delta = 10,75 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2,$$

$$S_5'' = \pi \cdot D_5'' \cdot b_\delta = 11,83 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ și},$$

$$S_5''' = \pi \cdot D_5''' \cdot b_\delta = 12,91 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2.$$

Deoarece valorile secțiunilor sînt apropiate, fluxul magnetic fiind aproximativ același, inducția magnetică  $B_5 = 0,6 \text{ T}$ , iar lungimea circuitului magnetic este:

$$l_5 = \frac{D_M - D_5'}{2} = 0,43 \text{ cm}.$$

#### Porțiunea VI

Această porțiune se consideră între diametrul exterior  $D_M$  și diametrul  $D_5'$  rezultînd o secțiune:

$$S_6 = \frac{\pi}{4} \cdot (D_M^2 - D_5'^2) = \frac{3,14}{4} \cdot (60^2 - 42,8^2) \cdot 10^{-6} = 13,88 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2.$$

Inducția magnetică în această porțiune este:

$$B_6 = \Phi_6 / S_6 = 8,25 \cdot 10^{-4} / 13,88 \cdot 10^{-4} = 0,59 \text{ T.}$$

$$H_c = 5,8 \text{ A/cm.}$$

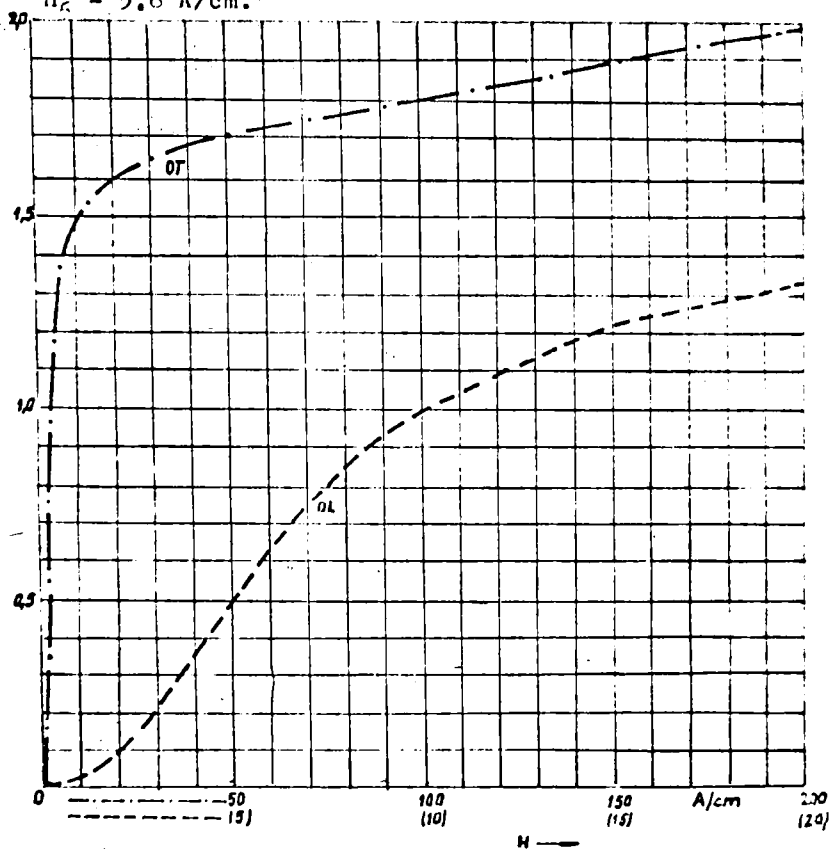


Fig.36. Curba de magnetizare pentru oțel laminat și oțel turnat, după /42/.

Lungimea circuitului magnetic este:

$$l_6 = b_8/2 + l_8 + b + l_9/2 = 3,24 \text{ cm.}$$

#### Porțiunea VII

Această porțiune s-a împărțit în cinci sectoare ale căror diametre sînt:  $D_7^I = D_5^{IV} = 0,0514 \text{ m}$ ;  $D_7^{II} = D_5^I = 0,0428 \text{ m}$ ;  $D_7^{III} = D_3^{II} = 0,038 \text{ m}$ ;  $D_7^{IV} = D_3^I = 0,03 \text{ m}$ ;  $D_7^V = D_3^V = 0,021 \text{ m}$ .

Secțiunile porțiunilor de circuit magnetic pentru  $l_7 = l_9 = 0,009 \text{ m}$  (modificat constructiv deoarece din calcule pentru  $l_9 = 0,009 \text{ m}$  rezultau valori foarte mari ale inducției magnetice) vor fi:  $S_7^I = 14,52 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ ;  $S_7^{II} = 12,09 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ ;  $S_7^{III} = 10,75 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ ;  $S_7^{IV} = 6,78 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$  și  $S_7^V = 5,39 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ .

Rezultă:

$$B_7^I = 0,57 \text{ T}; B_7^{II} = 0,68 \text{ T}; B_7^{III} = 0,78 \text{ T}; B_7^{IV} = 0,97 \text{ T};$$

$$B_7^V = 1,39 \text{ T și: } H_7^I = 5,5 \text{ A/cm}; H_7^{II} = 6,4 \text{ A/cm}; H_7^{III} =$$

$$7 \text{ A/cm}; H_7^{IV} = 9,6 \text{ A/cm}; H_7^V = 24 \text{ A/cm.}$$

Lungimea circuitului magnetic pe această porțiune este

$$l_7 = \frac{D_7^I - D_7^V}{2} = 1,52 \text{ cm.}$$

Tensiunea magnetomotoare rezultantă va fi dată de relația (45), rezultatele centralizate fiind prezentate în tabelul 8.

**TABELUL 8:** Calculul circuitului magnetic pentru FEP de 0,1 daN.m.

Porțiunea circuitului magnetic	Lungimea circuitului magnetic $l_i$ /cm/	Inducția magnetică $B_i$ /T/	Intensitatea cîmpului mag- netic $H_i$ /A/cm/	Tensiunea magnetomo- toare $U_{mm_i}$ /A.sp./
I	2,7	1,2	15,8	41,5
II	0,8	1,37	20	16
III	0,85	1,56	24	12,75
		1,09	12 $H_m=15$	
		0,86	8	
IV	-	0,55	-	117,5
V	0,43	0,69	6,5	2,8
VI	3,24	0,59	5,8	8,85
VII	1,52	0,57	5,5	16
		0,68	6,4	
		0,78	7 $H_m=10,5$	
		0,97	9,6	
		1,39	24	
$U_{mm} = U_{mm_i} = 225,4 \text{ A.sp.}$				

Conform calculelor efectuate, în conformitate cu geometria circuitului magnetic adoptată și modificată pe unele porțiuni, aceasta pe motivul că inducția magnetică rezultată din calcule avea valori foarte mari, tensiunea magnetomotoare rezultantă are valoarea de 225,4 A.sp. Comparînd această valoare cu solenația calculată  $w \cdot I_0 = 240 \text{ A.sp.}$ , rezultă că  $U_{mm} \neq w \cdot I_0$ , dar, această dife-

rență este foarte mică. Valoarea diferită ce apare se datorește faptului că la calculul tensiunii magnetomotoare nu am luat în considerare porțiunile de circuit existente la îmbinarea celor două elemente ce formează statorul FEP, plasate pe porțiunile de calcul I și VI din figura 32. Considerăm că rezultatele obținute teoretic sînt bune, rezultatele experimentale efectuate pe dispozitivul proiectat fiind foarte bune, existînd oarecare rezerve la valoarea cuplului de frînare, ceea ce ne duce la concluzia că circuitul magnetic nu ajunge la saturație.

După cum se poate observa din tabelul 8, valoarea tensiunii magnetomotoare în circuitul magnetic reprezintă circa 50%, restul revenind celor două întrefieruri.

Reducerea lățimii întrefierului devine o problemă tehnologică, deoarece, în mod practic, la lungimi mari ale întrefierului (la varianta constructivă luată în discuție), este foarte greu de executat uniform această porțiune și, mai mult, consolidarea rotorului devine foarte dificilă fiind necesar un al treilea element care să se fixeze pe statorul dispozitivului.

#### 4.2. Proiectarea unui FEP experimental cu $M_n = 20 \text{ daN.m}$ .

La proiectarea FEP de  $20 \text{ daN.m} / 50/$  am luat în considerare următoarele date inițiale:

- momentul nominal de frînare  $M_n = 20 \text{ daN.m}$ ;
- viteza nominală de rotație  $n_n = 1000 \text{ rot/min.}$ ;
- tensiunea de alimentare a bobinei de excitație  $U_e = 24 \text{ V}$  curent continuu.

În cazul acestui exemplu de calcul, am adoptat varianta constructivă de frînă cu rotor masiv, tip roată dințată (obadă), (figura 25 b), alegînd un întrefier  $\delta = 1,5 \text{ mm}$ .

Comparativ cu exemplul din 4.1., la proiectarea frinei de  $20 \text{ daN.m}$  am ales un singur întrefier, etanșarea împotriva pătrunderii pulberii feromagnetice la lagăre făcîndu-se prin capcane din oțel cu forță coercitivă mare și inele de etanșare din pișă.

Inițial, la dimensionarea frinei am luat în considerare executarea circuitului magnetic din oțel turnat (OT 45), cu conținut redus de carbon, prevăzînd un tratament de recoacere pentru omogenizare la circa  $800^\circ\text{C}$ , dar, pentru reducerea costului de producție la prototipul experimental /50/, am acceptat executarea acestuia din oțel laminat tip OL 52.2k ce are un conținut de carbon garantat.

Secțiunea longitudinală prin frîna proiectată arată ca în



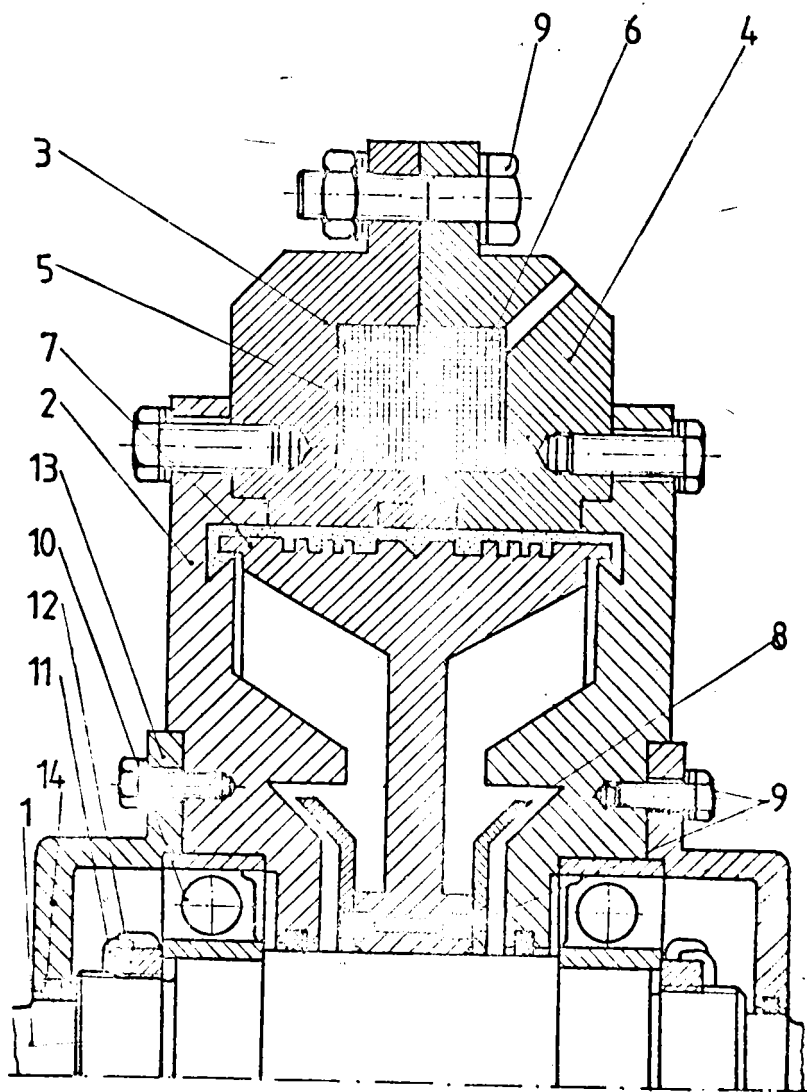


Fig.37. Secțiune longitudinală prin FEP de 20 daN.m.

În figura 37, unde: 1 - arbore rotor; 2 - scuturi laterale; 3 - stator stînga; 4 - stator dreapta; 5 - carcasă bobină; 6 - bobină de excitație; 7 - rotor; 8 - capace din oțel; 9 - șuruburi de fixare; 10 - rulmenți; 11 - guibe de siguranță; 12 - piulițe de siguranță; 13 - capac lagăr; 14 - inele de etanșare pistol.

La proiectarea acestei variante am adoptat o metodă originală, impunînd constructiv diametrul mediu  $D_m$  al întrefierului, determinînd tensiunea magnetotoare necesară și dimensionînd în funcție de aceasta, bobina de excitație. Circuitul magnetic a-a

dimensionat constructiv.

#### 4.2.1. Calculul principalilor parametrii

Pentru obținerea unei suprafețe de lucru mare în întrefier, nu am mai respectat indicațiile orientative date de tabelul 5 cu privire la raportul  $b_g/D_m$ , alegînd diametrul exterior al rotorului la nivelul întrefierului la valoarea  $D_m = 19 \text{ cm} = 0,19 \text{ m}$  și am calculat valoarea efortului specific de rezistență la deplasare  $T$ .

Conform relației (32), la o lungime a rotorului  $b_g = 6,6 \text{ cm}$ , vom avea:

$$T = \frac{200 \cdot M_n}{\pi \cdot D_m^2 \cdot b_g \cdot m} = \frac{200 \cdot 20}{3,14 \cdot 19^2 \cdot 6,6 \cdot 1} = 0,53 \text{ daN/cm}^2 \text{ cu men-}$$

țiunea că:  $M_n$  se exprimă în daN.m,  $D_m$  se exprimă în cm.,  $b_g$  se exprimă în cm., iar asupra valorii cuplului de frinare nu se ia în considerare nici-un coeficient de siguranță.

Valoarea obținută pentru  $T$  se încadrează în limitele indicate /22, 42, 53, 77/, dar, raportul  $b_g/D_m$  nu este indicat în literatura de specialitate pentru cuplul prescris. Deoarece rezultatele experimentale au fost mai mult decît satisfăcătoare, considerăm că nu-e cazul să ne limităm la valoarea acestui raport, deoarece valorile indicate în tabelul 5 sînt doar orientative referindu-se la cuplaje cu rotor de mică inerție, de tip pahar, iar noi am adoptat un rotor masiv.

Viteza periferică a rotorului va fi:

$$v = \frac{\pi \cdot D_m \cdot n_n}{60} = \frac{3,14 \cdot 0,19 \cdot 1000}{60} = 9,94 \text{ m/s.}$$

Din figura 28 se obține  $k_v = 0,95$ .

Utilizînd relația (34) și determinînd din tabelul 7, pentru pulbere fier carbonil și sticlă fin dispersată (P 8)  $k_p = 1,2$ , iar din figura 29,  $k_o = 0,7$  și  $\beta = 1,5$ , vom calcula valoarea inducției magnetice  $B$  în întrefier astfel:

$$B_g^{1,5} \frac{T}{k_p \cdot k_v \cdot k_o} = \frac{0,53}{1,2 \cdot 0,95 \cdot 0,7} = 0,664.$$

Rezultă:

$$B_g = 0,761 \text{ T și se adoptă,}$$

$$B_g = 0,8 \text{ T} = 8000 \text{ Gs, cu un coeficient de rezervă 1,05.}$$

Valoarea inducției magnetice în întrefier este o valoare acceptabilă, deoarece nu duce la saturația pulberii feromagnetice, (figura 42, capitolul 5).

4.2.2. Calculul tensiunii magnetomotoare  $U_{mm}$ .

În varianta proiectată, statorul și rotorul frinei se execută din oțel laminat și, luând în calcul pentru permeabilitatea magnetică a pulberii o valoare  $\mu_{\delta} = 7,5 \cdot 10^{-6}$  H/m, tensiunea magnetomotoare a întregului circuit se poate calcula cu relația:

$$U_{mm} = w \cdot I_e = U_{mm\delta} + \sum H_i \cdot l_i = m \cdot \delta \cdot \frac{B_{\delta}}{\mu_{\delta}} + \sum H_i \cdot l_i \quad (46)$$

Vom avea:

$$U_{mm\delta} = 1,5 \cdot \frac{0,8 \cdot 10^{-3}}{7,5 \cdot 10^{-6}} = 160 \text{ A.sp.}, \text{ iar pentru determinarea}$$

tensiunii magnetomotoare a circuitului magnetic ce intră în calcul vom utiliza schema de principiu din figura 38, unde am împărțit circuitul magnetic în unsprezece sectoare, iar rezultatele centralizate sînt redată în tabelul 9.

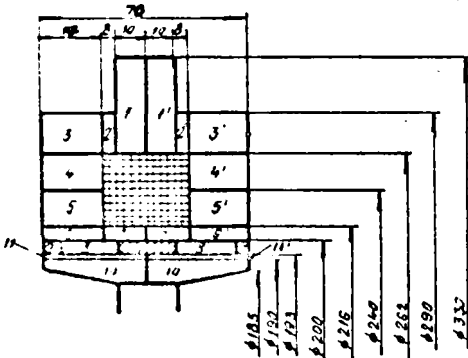


Fig.38. Schemă principială pentru calculul tensiunii magnetomotoare  $U_{mm}$ .

Conform calculelor efectuate, rezultă o valoare a tensiunii magnetomotoare  $U_{mm} = 281 \text{ A.sp.}$

Se poate observa că, în această variantă, pentru întrefieul  $\delta$  revine circa 57% din tensiunea magnetomotoare, iar pentru restul circuitului magnetic revine o valoare de numai 43%.

4.2.3. Calculul bobinei de excitație și al parametrilor electrici

Folosindu-ne de relația (38), la un diametru mediu al bobinei de excitație  $D_e = 23 \text{ cm} = 0,23 \text{ m}$ , pentru conductor de cupru, diametrul acestuia va fi:

$$d = 2 \cdot \sqrt{\frac{U_{mm} \cdot D_e \cdot \rho}{U_e}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{281 \cdot 0,23 \cdot 0,0175}{24}} = 0,43 \text{ mm.}$$

Pentru un curent de excitație  $I_e = 0,5 \text{ A}$  și pentru o densitate de curent  $J = 3 \text{ A/mm}^2$ , diametrul conductorului de bobinaj trebuie să satisfacă relația:

$$d \geq \sqrt{\frac{4 \cdot I_e}{\pi \cdot J}} \geq \sqrt{\frac{4 \cdot 0,5}{3,14 \cdot 3}} = 0,46 \text{ mm.}$$

Conform STAS 8516-83 se alege conductor de cupru emailat tip EM 1 cu  $d = 0,47$  mm și  $d_{iz} = 0,51$  mm.

TABELUL 9: Calculul tensiunii magnetotoarcă  $U_{mm}$  pentru FEP de 20 deN.m.

Sector	$l_i$ /cm/	$B_i$ /T/	$H_i$ /A/cm/	$U_{mm_i}$ /A.sp./
1	2,0	0,75	7,0	14,0
2	1,6	0,41	4,5	7,2
3	3,1	0,25	3,5	10,8
4	2,2	0,26	3,5	7,7
5	2,4	0,75	7,0	16,8
6	1,6	0,46	4,8	7,7
7	1,6	0,75	7,0	11,2
8	0,7	0,3	3,8	2,7
9	0,7	0,4	4,3	3,0
10	5,3	0,8	7,5	39,7
11	-	0,8	-	100,0

$$U_{mm} = 280,8 = 281 \text{ A.sp.}$$

Luind în considerare tensiunea magnetotoarcă necesară de 281 A.sp., numărul de spire al bobinei de excitație va fi:

$$w_o = \frac{U_{mm}}{I_e} = \frac{281}{0,5} = 562 \text{ spire.}$$

Adoptind constructiv suprafața ferestrei bobinei  $S_o = 14 \cdot 14 = 196 \text{ mm}^2$ , la un coeficient de umplere al ferestrei  $k_{uf} = 0,6$ , numărul de spire real ce încap în fereastră va fi dat de:

$$w = \frac{4 \cdot k_{uf} \cdot S_o}{\pi \cdot d_{iz}^2} = \frac{4 \cdot 0,6 \cdot 196}{3,14 \cdot 0,51^2} = 575 \text{ spire, valoare ce se a-$$

doptă la executarea bobinei de excitație.

Rezistența electrică a bobinei de excitație se determină cu relația (41):

$$R_e = \rho_{20^\circ C} \cdot \frac{4 \cdot D_e \cdot w}{d^2} = \frac{4 \cdot 0,23 \cdot 575}{0,47^2} = 41,9 \Omega = 42 \Omega.$$

Căderea de tensiune în bobina de excitație va fi:

$$U = I_e \cdot R_e = 0,5 \cdot 42 = 21 \text{ V, iar puterea de comandă e:}$$

$$P_e = R_e \cdot I_e^2 = 42 \cdot 0,5^2 = 10,5 \text{ W.}$$

Inductanța bobinei de excitație  $L_e$  dată de relația (44) pentru  $b_g = 6,6 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ ,  $D_m = 0,19 \text{ m}$ ,  $B_g = 0,8 \text{ T}$  și  $k_g = 1,5$  va fi:

$$L_e = w \cdot \frac{\varnothing_s}{I_e} = w \cdot \frac{k_s \cdot D_s \cdot S_s}{I_e} = \frac{\pi \cdot k_s \cdot D_s \cdot D_m \cdot b_s}{I_e} =$$
$$= \frac{3,14 \cdot 1,5 \cdot 0,8 \cdot 0,19 \cdot 0,066}{0,5} = 68,35 \text{ H.}$$

Rezultă constanta de timp electrică  $T_e = L_e/R_e = 1,62 \text{ s} = 1620 \text{ ms}$ , mult mai mare decît la frîna de  $0,1 \text{ daN.m}$ , ținînd cont și de faptul că masele de mișcare în rotație sînt mai mari.

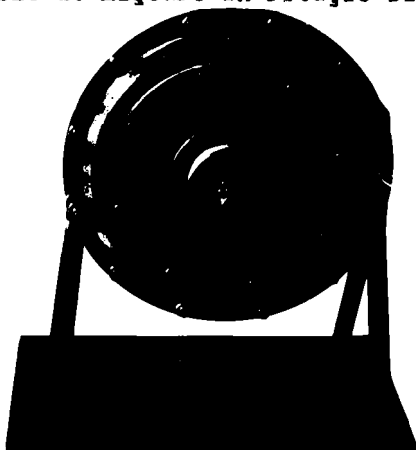


Fig.39. Vedere generală a FEP de 20 daN.m.

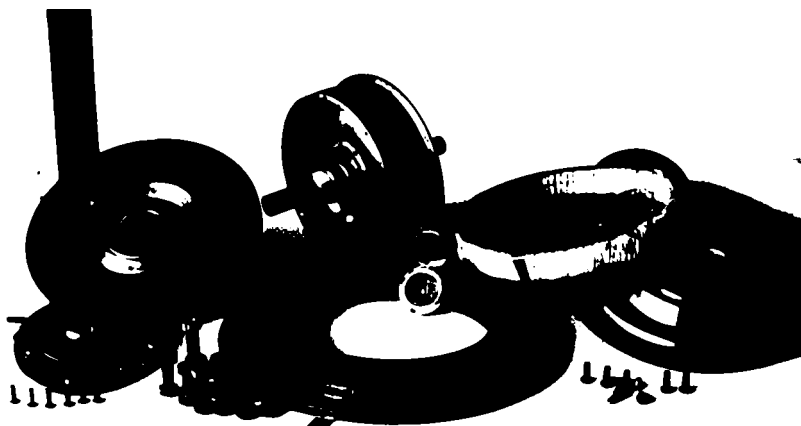


Fig.40. Elemente componente ale FEP de 20 daN.m.

Frîna proiectată, executată și experimentată arată în vedere generală ca în figura 39, iar în figura 40 se pot vedea o parte din elementele sale componente.

Etangarea rulmenților împotriva pătrunderii pulberii s-a făcut cu inele de pișă și două apărători montate pe rotor din Ol 60.

## CAPITOLUL 5

### CERCETARI EXPERIMENTALE PE FEP EXECUTATE

Cele două FEP proiectate în Capitolul anterior au fost supuse cercetărilor experimentale, primul pe un ștand de încercări realizat la I.S. Baia Mare, al doilea pe un ștand de încercări realizat la I.M.M.U.M. Baia Mare.

În scopul determinărilor experimentale am utilizat următoarele trei tipuri de pulbere feromagnetică: pulbere din fier carbonil, marca P 8, cu granulație maximă de  $8 \mu\text{m}$ , forma granulelor fiind apropiată de forma sferică, în amestec cu sticlă fin dispersată obținută din U.R.S.S.; pulbere feromagnetică tip 410 L de proveniență din Austria (firma Vibrometer), cu dimensiuni ale granulelor sub  $14 \mu\text{m}$  de formă dendritică și pulbere indigenă preparată în laborator, din oțel obișnuit, în cantități reduse, numai pentru frina de  $0,1 \text{ daN.m}$ .

După /42/ curba de magnetizare și variația permeabilității magnetice funcție de intensitatea câmpului magnetic sau a inducției magnetice arată ca în figurile 41 și 42.

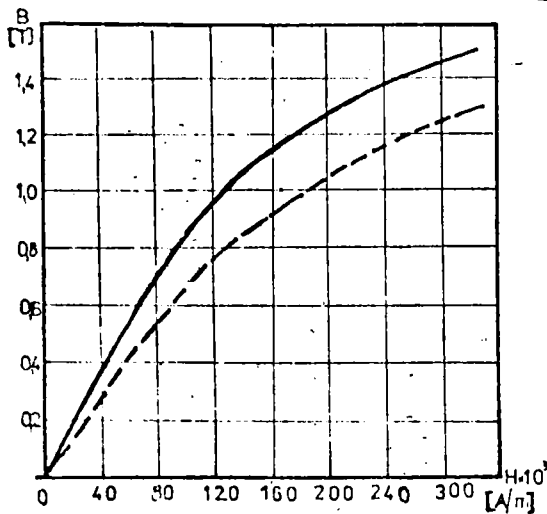


Fig. 41. Curba de magnetizare pentru pulbere P 8, în amestec cu sticlă fin dispersată: -pulbere/separator 40/1, respectiv -- 20/1.

Deoarece cantitatea de pulbere obținută din U.R.S.S. de tipul P 8 a fost suficientă, am efectuat încercări experimentale pe ambele tipuri de frine proiectate și executate. Conform figurii 42, pentru pulberea feromagnetică P 8, la variații ale inducției magnetice între  $0,3$  și  $1,7 \text{ T}$  se observă că  $\mu$  variază între  $(5,5 - 10,2) \cdot 10^{-6} \text{ H/m}$ .

Pentru efectuarea încercărilor cu pulbere tip 410 L (Austria)

cărei compoziție chimică în procente este: Fe - baza; Si - 0,61%; Mn - 0,03%; Cr - 11,62%; Ni - 1,16%; Mo - 7,81%; Al - 0,037%;

Cu - 0,01%; P - 0,017%; C - 0,8% și S - 0,06%  
(după buletin de analiză 487/7.III.1933 - I.C.E.M. - București).

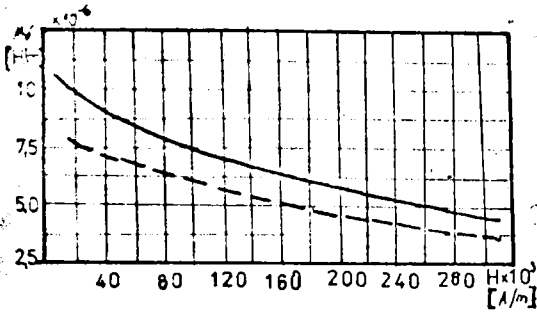


Fig. 42. Variația permeabilității magnetice în funcție de inducția pentru pulbere P 8: — raportul pulbere/separator 40/1, respectiv --20/1.

Pentru efectuarea încercărilor, prin bunăvoința cercetătorilor de la întreprinderea "Sinterom" din Cluj-Napoca, am determinat caracteristica de magnetizare a pulberii tip 410 L, adică

$B = f(H)$ . Conform tabelului 10, am ridicat curba de magnetizare

TABELUL 10: Variația  $B = f(H)$  pentru pulbere tip 410 L.

$H \times 10^3$ [A/m/]	10	20	30	40	50	75	100	150	200
$B_g$ [T/]	0,11	0,21	0,3	0,38	0,43	0,6	0,75	1,0	1,18
$\mu_g \times 10^{-6}$ [H/m/]	11,0	10,5	10	9,7	8,6	8	7,5	6,6	5,9

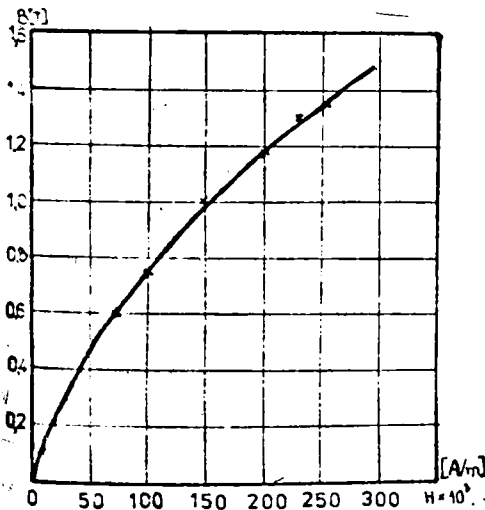


Fig. 43. Curba de magnetizare pentru pulbere tip 410 L (Austria).

din figura 43 și am extras curba  $\mu_g = f(B)$  din figura 44, necunoscînd materialul separator existent în pulbere.

Se observă că, pentru inducții magnetice cuprinse între 0,2 și 1,7 T, variația permeabilității magnetice  $\mu_g$  se află în limitele (4 - 10)  $\times 10^{-6}$  H/m, ceea ce ne duce la concluzia că proprietățile magnetice ale acestui tip de pulbere sînt foarte bune, fiind indicată la realizarea dispozitivelor de frinare, proprietăți comparabile cu

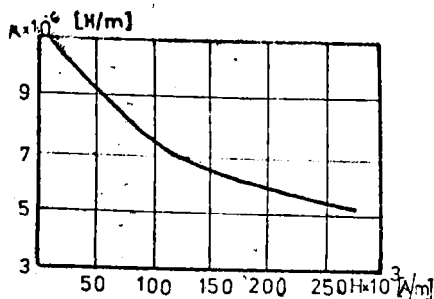


Fig.44. Variația permeabilității magnetice cu inducția pentru pulbere tip 410 L (Austria).

Pentru FEP de 0,1 daN.m, la căre volumul în exces al întrefierului este de  $3,1 \text{ cm}^3$  la  $\delta = 1 \text{ mm}$ , necesitând o cantitate redusă de pulbere pentru încercări experimentale, am realizat în condiții de laborator, pulbere metalică din oțel obșnuit.

Pentru obținerea pulberii "înșigere", am utilizat bare metalice cu diametre pînă la 10 mm și prin polizare cu o piatră abrazivă de granulație medie am obținut particulele grosolane. După șpararea acestora de impuritățile nemagnetice cu ajutorul unui magnet permanent, am măcinat aceste particule grosolane într-un mojar de agat. Obținerea unor particule cu granulație mică s-a realizat prin utilizarea unui set de site de cernere acționate electric, dimensiunea minimă a ochiurilor fiind de  $18 \mu\text{m}$ . Am reținut pentru încercările experimentale, numai particulele care au trecut prin sita de  $18 \mu\text{m}$ . După spălări repetate cu apă distilată, după filtrarea într-un creuzet filtrant sub vid, am supus particulele unei uscări lente într-o etuvă termoreglabilă la temperatura de  $80^\circ\text{C}$ . Greutatea specifică aparentă a pulberii obținute are valoarea de  $4,2 \text{ gf/cm}^3$  și am preparat circa 150 g de pulbere.

Ca material separator am utilizat sticla fin dispersată obținută în urma măcinării în mojarul de agat și cernerea acesteia pînă la obținerea unei granulații de  $18 \mu\text{m}$ . Proporția în greutate a separatorului față de pulbere s-a ales în raportul 1:40 și 1:20.

Am determinat la "Sinterom" Cluj-Napoca, variația intensității cîmpului magnetic cu inducția magnetică. După ridicarea acestei caracteristici, după tabelul 11, din figura 45 am extras valorile permeabilității magnetice  $\mu$  și am trasat variația acesteia pentru diferite inducții magnetice din figura 46.

După cum se poate observa, proprietățile magnetice ale pulberii obținute sînt satisfăcătoare, pentru inducții magnetice între 0,2 - 1,4 T, valoarea permeabilității magnetice situîndu-se în limitele  $(4,6 - 7,2) \cdot 10^{-6} \text{ H/m}$ , adică de (3,6 - 5,7) ori mai mare



**TABELUL 11\*** Variația inducției și permeabilității magnetice în funcție de intensitatea cîmpului magnetic pentru pulberea preparată.

$H \times 10^3$ /A/m/		10	20	30	40	50	75	100	150	200	250
- /A/	F.s	0,08	0,15	0,22	0,27	0,32	0,47	0,61	0,87	1,08	1,2
	C.s.1:40	0,07	0,13	0,18	0,22	0,26	0,40	0,51	0,77	0,98	1,1
	C.s.1:20	0,06	0,11	0,16	0,21	0,25	0,35	0,45	0,64	0,82	0,98
$\times 10^{-6}$ /A/m/	F.s	8	7,5	7,3	6,7	6,5	6,3	6	5,8	5,4	4,8
	C.s.1:40	7	6,5	6	5,5	5,3	5,2	5,1	5,1	4,9	4,4
	C.s.1:20	6	5,5	5,3	5,2	5	4,7	4,5	4,3	4,1	3,9

Decît permeabilitatea magnetică a vidului. Aceste valori sînt

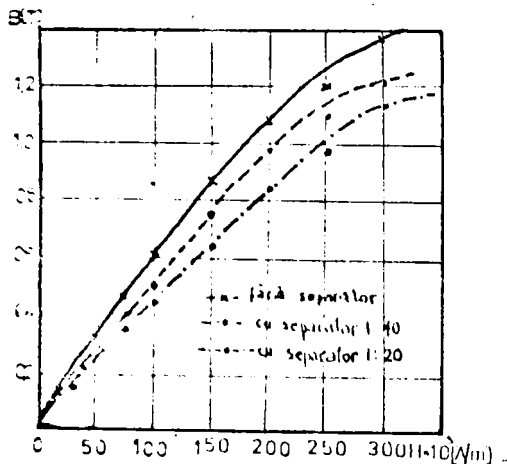


Fig.45. Curba de magnetizare pentru pulberea preparată în laborator.

mult mai reduse decît cele ale pulberilor din import, pentru care, permeabilitatea magnetică are valori de  $(6 - 10) \cdot 10^{-6}$  H/m, dar, trebuie ținut cont de faptul că s-a utilizat oțel obișnuit, fără a dispune de instalații speciale, forma particulelor nu este sferică, iar granulația este destul de mare.

Deoarece utilizarea pulberii fără separator duce la aglomerarea acesteia, conform tabelului 11 și fi-

gurile 45, 46, se poate observa faptul că în cazul utilizării pulberii preparată, caracteristicile sale magnetice în prezența separatorului vor fi reduse, permeabilitatea sa magnetică în domeniul de lucru al FMP (inducției magnetice între 0,2 și 1,4 T) are valori între  $(6 - 4,3) \cdot 10^{-6}$  H/m în varianta 1:40 separator și  $(5,5 - 3,8) \cdot 10^{-6}$  H/m în varianta 1:20 separator. Acest lucru ne duce la concluzia că permeabilitatea magnetică a pulberii cu separator este  $(4,8 - 3,4) \cdot 10^{-6}$  ori, în primul caz și  $(4,2 - 3) \cdot 10^{-6}$  ori.

**Notă\***: În tabelul 11 am notat: F.s - pulbere fără separator; C.s. - pulbere cu separator în raportul respectiv.

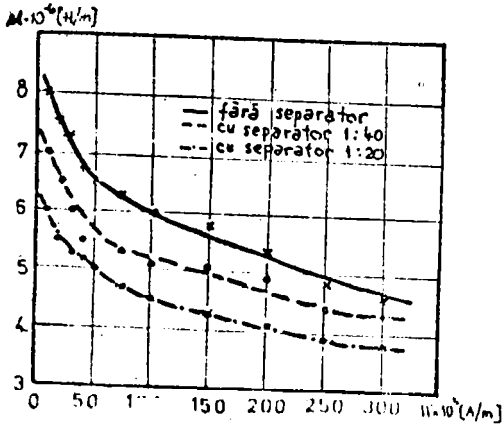


Fig.46. Variația permeabilității magnetice cu inducția pentru pulberea preparată în laborator.

in al doilea caz, mai mare decât permeabilitatea magnetică a vidului. Așa cum era de așteptat, în urma cercetărilor experimentale, valoarea cuplului de frinare a fost mai mică decât în cazul utilizării pulberilor din import.

Incercările experimentale pe cele două FEP proiectate, efectuate printr-o procedură special amenajată, s-au făcut în scopul determinării variației cuplului de frinare în funcție de valoarea curentului de excitație, variației cu-

plului de frinare în funcție de cantitatea amestecului de cuplere introdusă în întrefier, variația cuplului în funcție de dimensiunile întrefierului, variația cuplului în funcție de viteza de rotație a frinei și variația cuplului în funcție de modificarea unor materiale ale elementelor componente. De asemenea, am încercat să urmăresc variația temperaturii dispozitivelor în funcție de timp, la momente de frinare diferite, în scopul determinării condițiilor în care frinele funcționează în regim de lungă durată.

Incercările experimentale au fost efectuate utilizând pulbere feromagnetică tip P 8 (U.R.S.S.), pulbere tip 410 L (Austria) și pulbere preparată în laborator din oțel obișnuit marca CL 37 (numai pentru frina de 0,1 dal.m, deoarece obținerea acestei pulberi în cantități mari este foarte anevoiasă).

### 5.1. Incercări experimentale pentru FEP de 0,1 dal.m.

Pentru efectuarea măsurătorilor necesare am realizat un stand experimental a cărui vedere generală poate fi urmărită din figura 47. Motorul de acționare -1 este un motor monofazat de tip KOLEKTOR (Ungaria) cu o putere de 80 W la o viteză de rotație de 1500 rot/min., cu posibilitatea de modificare în limite largi a vitezei de rotație prin modificarea tensiunii de alimentare între 0 - 220 V, curent alternativ. În prealabil, am încercat cu o frână mecanică, să văd dacă la viteze reduse motorul de acționare

poate asigura cuplul de frinare (de transmis) necesar. Cuplarea motorului de acționare cu frâna s-a făcut prin intermediul unui cuplaj rigid - 2, iar statorul frinei s-a fixat în lagărul cu rulment - 3, întregul ansamblu fiind fixat în suportul - 4 din tablă de oțel cu grosimea de 7 mm în scopul evitării vibrațiilor. Pentru

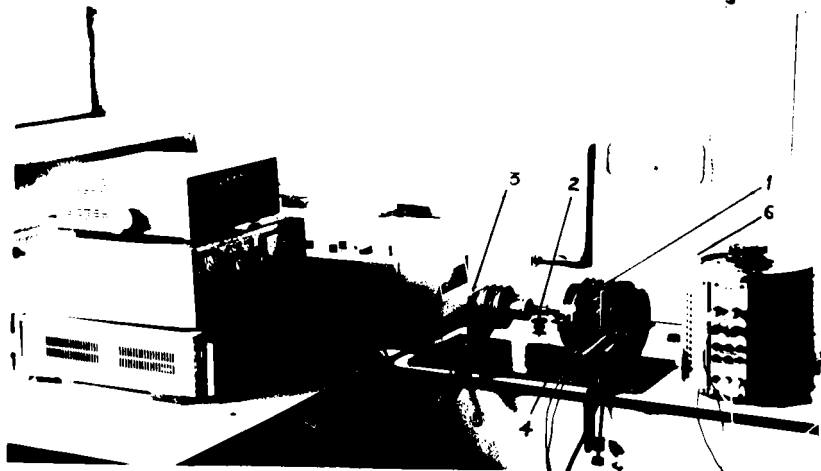


Fig.47. Vedere generală a standului de încercări pentru FEP de 0,1 daN.m.

Măsurarea cuplului de frinare, pe frână s-au montat două brațe de măsură - 5 cu lungimea de 0,25 m, iar măsurarea cuplului de frinare s-a efectuat prin înmulțirea forței indicată de balanța de laborator - 6 (cu precizie de 0,1gf) cu lungimea brațului de măsurare. Precizăm că, în rezultatele prezentate în continuare se dau valorile reale ale cuplului de frinare. Pentru măsurarea vitezei de rotație s-a utilizat un tahometru calculator tip N 2603, măsurarea curentului de excitație și a tensiunilor s-a făcut cu un multimetru digital tip E 0302, măsurarea temperaturii s-a făcut cu un termometru de laborator practicând un orificiu în stator pînă la carcasa bobinei de excitație, cu domeniu maxim de 150°C, iar pentru determinarea constantei de timp a dispozitivului s-a utilizat un înregistrator XY prevăzut cu bază de timp de tipul XY-Recorder endim 620.02 (R.D.Germania).

Menționăm că, efectuarea măsurătorilor, pe cît a fost posibil, s-a făcut simultan, deoarece la fiecare modificare a întregului sistem este necesară demontarea statorului și modificarea dimensiunilor sale constructive, iar din aceste măsurători simultane am ales pe acelea ce ne interesează în mod deosebit la o proiectare optimă.

Deoarece, din motive tehnologice și constructive, ținând cont de viteza de rotație destul de mare la care a fost proiectată frâna de 0,1 daN.m, din cauza problemelor legate de realizarea paralelismului între rotor și stator, am realizat experimentările pentru un întrefier minim de 0,6 mm. După efectuarea încercărilor experimentale am modificat valoarea întrefierului la 0,8 mm și la 1 mm, la fiecare valoare a întrefierului modificând cantitatea de pulbere până la obținerea valorii maxime a cuplului de frinare la aceeași valoare a curentului de excitație. Aceste măsurători au fost efectuate pentru cele trei tipuri de pulbere feromagnetice de care am dispus.

Datorită faptului că rezultatele obținute în unele experimentări dispozitivelor cu pulberi feromagnetice din import au dat rezultate foarte apropiate, în cele ce urmează vom reda doar rezultatele obținute cu un singur tip de pulbere din import și cele obținute cu pulbere indigenă (preparată în laborator), aceasta pentru a demonstra faptul că, performanțele dispozitivelor tip FEP depind foarte mult de calitățile (performanțele) magnetice ale amestecului de umplere utilizat.

#### 5.1.1. Incercări experimentale pentru $\delta = 0,6$ mm

Din calculul efectuat pentru determinarea volumului în exces al întrefierului, rezultă că volumul maxim de amestec de umplere teoretic este de  $1,8 \text{ cm}^3$ .

##### 5.1.1.1. Caracteristica statică $M = f(I_e)$ .

Determinarea acestei caracteristici s-a efectuat în mai multe variante, ținând cont de cantitatea amestecului de umplere introdus în întrefier. Pentru pulbera din import, tip 410 L, la valori fixe ale curentului de excitație și coeficienți de umplere în volum a întrefierului cu pulbere  $k_{uv} = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$  și  $1,0$ , am ajuns la concluzia (cu referire la tabelul 12 și figura 48) că, pentru un curent maxim de excitație de 140 mA, valoarea maximă a cuplului de frinare este de 0,165 daN.m, la un coeficient de umplere în volum al întrefierului  $k_{uv} = 1$ . Dar, urmărind variația temperaturii dispozitivului în acest caz, se constată o creștere excesivă a acesteia, cuplul rezidual are o valoare de 0,02 daN.m (circa 12% din cuplul maxim), valoare foarte mare în comparație cu dispozitivele similare executate în străinătate și, mai mult, la viteze reduse se percep zgomote ale unor suprafețe în frecare.

TABELUL 12: Variația  $M = f(I_e)$  pentru diferite valori  $k_{uv}$

$I_e$ /mA/	0	20	40	60	80	100	120	140
$k_{uv}=0$	0	0	0	0,005	0,01	0,015	0,02	0,025
$k_{uv}=0,2$	0	0	0,01	0,025	0,04	0,045	0,05	0,055
$k_{uv}^u=0,4$	0	0,005	0,02	0,04	0,06	0,075	0,08	0,085
$k_{uv}=0,6$	0	0,01	0,03	0,055	0,08	0,105	0,115	0,12
$k_{uv}=0,8$	0,005	0,025	0,05	0,08	0,105	0,135	0,15	0,155
$k_{uv}=1,0$	0,02	0,045	0,06	0,09	0,12	0,145	0,16	0,165

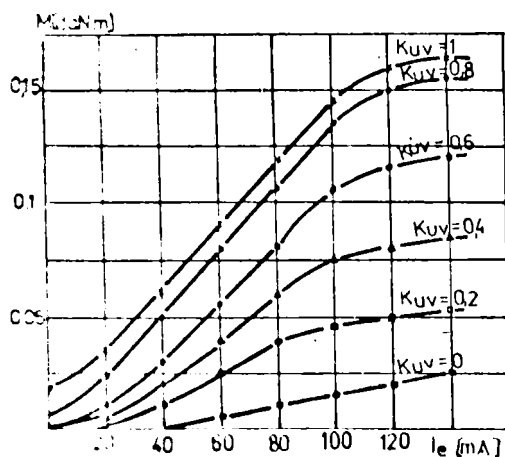


Fig. 48. Caracteristica statică pentru FEP de 0,1 daN. m și  $\delta = 0,6$  mm

După cum se poate observa din tabelul 12 și figura 48, la un coeficient de umplere teoretic în volum al întrefierului  $k_{uv} = 0,8$  și un curent de excitație  $I_e = 100$  mA, cuplul rezidual este redus (4,1%), iar în timpul experimentărilor temperatura dispozitivului a fost acceptabilă.

La efectuarea încercărilor experimentale prezentate anterior, viteza de rotație a frinei a fost constantă, de 750 rot/min., menținând dispozitivul la fiecare încercare cel puțin un minut, pentru stabilizarea cuplului de frinare.

Menționăm că, încercările experimentale s-au efectuat la 750 rot/min., deoarece indiferent de viteza de rotație (din încercări experimentale efectuate), valoarea cuplului de frinare nu se modifică numai în jurul valorii de 1400 rot/min.

După cum se poate observa, pentru intervale de timp reduse, valoarea cuplului de frinare pentru  $I_e = 100$  mA (valoare luată în considerare la proiectarea frinei) este o valoare acceptabilă, valoarea coeficientului de siguranță de 1,5 asupra cuplului de frinare fiind acoperitoare. Cu mențiunea că, în fază inițială, am adoptat un coeficient de siguranță asupra cuplului egal cu 4, rezultatele obținute experimental erau discordante cu calculul de proiectare, fiind pus în situația de a modifica atât parametrii de

calculul cit și dimensiunile geometrice, pentru a obține rezultate experimentale apropiate de scopul proiectării.

Conform rezultatelor obținute, din figura 48, se poate observa aspectul aproape liniar al caracteristicii statice în domeniul de lucru, până la valoarea de saturație, care depinde și de volumul de pulbere introdusă în întrefier. Curentul de saturație se reduce cu cit cantitatea de pulbere introdusă în întrefier este mai mică, aceasta pe motivul că permeabilitatea magnetică a pulberii nu scade liniar cu creșterea intensității cimpului magnetic  $H$ .

După curățirea dispozitivului, s-a procedat la efectuarea de încercări experimentale cu pulbere tip P 8 (U.R.S.G.), la timp de funcționare de un minut la fiecare încercare. Rezultatele obținute au fost foarte apropiate cu cele obținute în cazul încercărilor cu pulbere tip 410 L (Austria), cu precizarea că la un curent de excitație de 100 mA s-a obținut o creștere a cuplului cu cea 2<sup>a</sup> pentru pulberea P 8.

S-au reluat aceleași încercări cu pulberea preparată în laborator, încercări redată sintetic în tabelul 13 și figura 49.

TABELUL 13: Variația  $M = f(I_e)$  pentru diferite valori  $k_{uv}$ .

$I_e$ /mA/		0	20	40	60	80	100	120	140
M /3aN.M/	$k_{uv}=0$	0	0	0	0,005	0,01	0,015	0,02	0,025
	$k_{uv}=0,2$	0	0	0	0,01	0,02	0,03	0,035	0,04
	$k_{uv}=0,4$	0	0,01	0,005	0,01	0,03	0,045	0,05	0,055
	$k_{uv}=0,6$	0	0	0,01	0,03	0,05	0,07	0,075	0,08
	$k_{uv}=0,8$	0	0,01	0,025	0,045	0,06	0,085	0,1	0,105
	$k_{uv}=1$	0,01	0,02	0,035	0,055	0,07	0,09	0,105	0,11

În conformitate cu măsurătorile experimentale efectuate, urmărind tabelul 13 și figura 49 se constată că valoarea cuplului rezidual este sesizabilă chiar și la un coeficient de umplere al întrefierului cu pulbere  $k_{uv} = 0,8$ , iar valorile maxime ale cuplului obținut sînt mai reduse cu circa 37% în cazul utilizării pulberii preparată în laborator, decît în cazul utilizării pulberilor din import. Acest lucru era de așteptat deoarece forma granulelor nu este nici pe departe sferică, fiind realizată dintr-un oșel cobîgnut, cu caracteristici de magnetizare reduse, ceea ce duce la

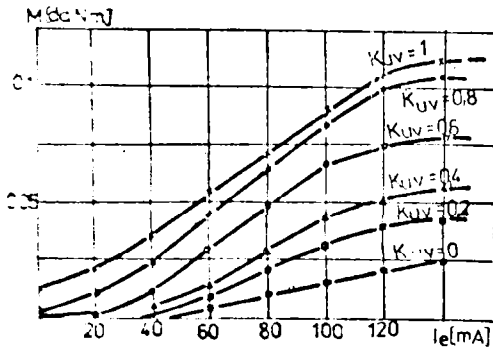


Fig.49. Caracteristica statică la FEP de 0,1 daN.m cu pulbere pre- parată în laborator.

o tensiune magnetomotoare  $U_{mm}$  în întrefier mai mică, reducându-se și valoarea cuplului de frinare.

5.1.1.2. Caracteristica me anică  
 $n = f(M)$ .

Deoarece reducerea vitezei de rotație a motorului de antrenare la valori foarte mici (de ordinul unei rotații pe minut) nu a fost posibilă, cuplul motorului tinzînd spre

zero, pentru viteze mici, am intercalat între motor și frînă un reductor planetar cu un cuplu minim transmis de 0,2 daN.m la 1 rot/min, cu raport de transmitere de 1:150. În acest fel, am putut modifica viteza de rotație a frinei de la 0-100 rot/min., ceea ce nu era necesar, fiindcă indiferent de viteza de rotație, cuplul se menține constant, pînă la o anumită valoare a vitezei de rotație la care începe să scadă aproape liniar pînă la zero.

Rezultatele experimentale obținute cu pulberi din import sînt prezentate în tabelul 14 și redată grafic în figura 50 pentru pulbere tip P8, cele pentru pulbere tip 410 L fiind aproape similare.

TABELUL 14\*: Variația  $n = f(M)$  pentru diferite valori ale curentului de excitație  $I_e$ .

$n$ /rot/min./	100	200	600	1000	1200	1400	1500	1600
$I_e=20$	0,025	0,025	0,02	0,025	0,03	0,025	0,02	0,01
$I_e=40$	0,045	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,045	0,035
$I_e=60$	0,08	0,075	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,055
$I_e=80$	0,105	0,105	0,100	0,105	0,11	0,105	0,095	0,08
$I_e=100$	,135	0,135	0,135	0,135	0,13	0,135	0,125	0,11
$I_e=120$	,15	0,15	0,15	0,145	0,15	0,15	0,135	0,125

Notă: În tablă nu au fost reținute valorile la  $n = 400$  și  $800$  rot/min., prezentate în figură, din motive de dactilografiere.

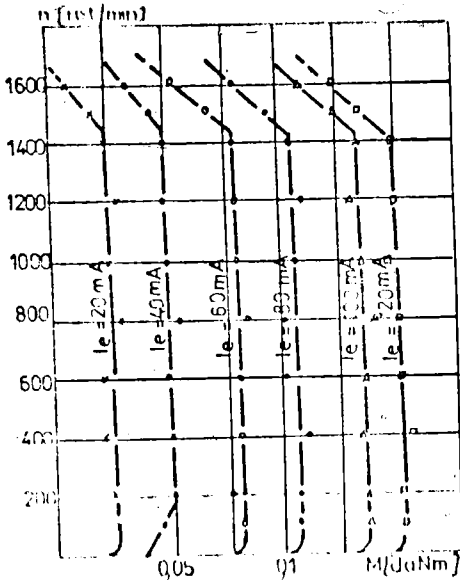


Fig. 50. Caracteristica mecanică la FEP de  $0,1 \text{ daN.m}$  cu pulbere tip P 8.  $k_{uv}$  e mai mic.

Menționăm că, aceste date au fost reținute la un coeficient de umplere al întrefierului cu pulbere  $k_{uv} = 0,8$ , cu precizarea că la reducerea acestui coeficient, valoarea cuplului scade ca valoare, dar se menține constant în funcție de viteza de rotație. Din încercările efectuate am observat că valoarea cuplului de frinare începe să scadă la viteze de rotație mai mari, pentru coeficienți de umplere  $k_{uv}$  mai mici, aceasta probabil din cauza scăderii coeziunii în pulberea feromagnetică, adică ruperea "legăturilor"

Viteza maximă de rotație a frinei a fost de  $1600 \text{ rot/min}$

prin supraalimentarea motorului de antrenare pentru un interval de timp scurt, observând că, valoarea momentului transmis se reduce în jurul valorii de  $1400 - 1450 \text{ rot/min}$ , viteza de rotație ce se poate considera limită pentru menținerea constantă a cuplului de frinare. Rezultă că, valoarea cuplului de frinare, nu poate fi menținută constantă la valori mari ale vitezei de rotație.

Pe baza rezultatelor experimentale obținute considerăm că la proiectarea FEP e necesar să luăm un coeficient de rezervă asupra vitezei maxime de lucru a acesteia, în limitele  $1,05 - 1,1$ , pentru a avea siguranța obținerii cuplului de frinare dorit la viteza de rotație impusă.

Valorile vitezei de rotație, obținute experimental, la care cuplul de frinare începe să scadă, pentru frina de  $0,1 \text{ daN.m}$  sînt: la  $I_e = 20 \text{ mA}$ ,  $n = 1460 \text{ rot/min}$ , la  $I_e = 40 \text{ mA}$ ,  $n = 1450 \text{ rot/min}$ , la  $I_e = 60 \text{ mA}$ ,  $n = 1440 \text{ rot/min}$ , la  $I_e = 80 \text{ mA}$ ,  $n = 1430 \text{ rot/min}$ , la  $I_e = 100 \text{ mA}$ ,  $n = 1425 \text{ rot/min}$  și la  $I_e = 120 \text{ mA}$ ,  $n = 1400 \text{ rot/min}$ .

Conform celor arătate, valoarea vitezei limită la care cuplul începe să scadă, depinde și de valoarea curentului de excita-



ție  $I_e$ , fiind mai redusă, pentru curenți mai mici:

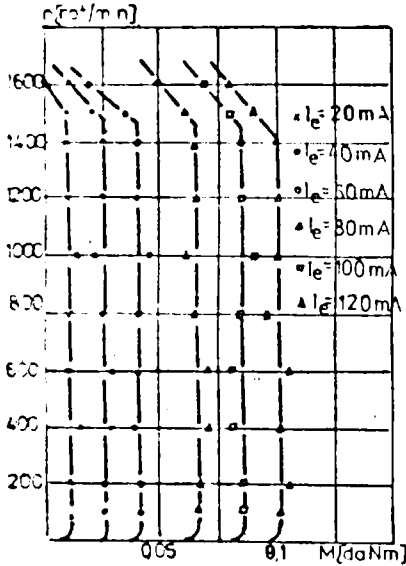


Fig. 51. Caracteristica mecanică la frina de 0,1 daN.m cu pulbere preparată în laborator.

Incercările experimentale efectuate cu pulberea preparată în laborator, au dus la caracteristici mecanice asemănătoare ca formă, dar cu valori mai mici ale cuplului de frinare ( în conformitate cu rezultatele obținute și în § 5.1.1.1.) și cu o încălzire mai accentuată a dispozitivului la viteze de rotație mai mari, ceea ce, cred că se datorește dimensiunilor mai mari ale particulelor de pulbere, care duc la forțe de frecare mai mari. De asemenea, din rezultatele experimentale obținute, se poate vedea că, scăderea cuplului de frinare se produce pentru viteze de rotație comparabile cu cele de la pulberea din import, adică între 1400 și 1450 rot/min, după cum

rezultă din tabelul 15 și figura 51.

TABELUL 15: Variația  $n = f(M)$  pentru diferite valori ale curentului de excitație  $I_e$

$n/\text{rot}/\text{min.}/$		100	200	600	1000	1200	1400	1500	1600
$M$ /daN.m/	$I_e=20$	0,01	0,01	0,01	0,015	0,01	0,01	0,01	0
	$I_e=40$	0,025	0,025	0,03	0,02	0,025	0,025	0,02	0,01
	$I_e=60$	0,04	0,04	0,035	0,045	0,04	0,04	0,035	0,02
	$I_e=80$	0,065	0,065	0,07	0,06	0,065	0,065	0,06	0,05
	$I_e=100$	0,085	0,085	0,08	0,09	0,085	0,085	0,08	0,07
	$I_e=120$	0,1	0,105	0,105	0,1	0,1	0,1	0,09	0,08

Valorile de scădere ale cuplului de frinare obținute experimental, se realizează, în acest caz, în funcție de viteza de rotație astfel: la  $I_e = 20$  mA,  $n = 1500$  rot/min., la  $I_e = 40$  mA,  $n = 1480$  rot/min., la  $I_e = 60$  mA,  $n = 1465$  rot/min., la  $I_e = 80$  mA,  $n = 1445$  rot/min., la  $I_e = 100$  mA,  $n = 1440$  rot/min. și la

la  $I_a = 120$  mA,  $n = 1420$  rot/min. Totuși, aceste valori par superioare decît în cazul utilizării pulberii din import dar, consider că nu ne pot duce la concluzia că pulberea preparată în laborator este mai bună. Deoarece temperatura dispozitivului a fost mai mare la încercările cu pulberea preparată în laborator, consider că, în conformitate cu rezultatele prezentate, proprietățile magnetice ale acestora sînt mai reduse decît ale pulberilor din import utilizate.

### 5.1.1.3. Comportarea termică a frinei

Din încercările anterioare am observat că dispozitivul are o bună comportare la un coeficient de umplere teoretic al întrefierului cu pulbere  $k_{uv} = 0,8$ . Pentru această valoare, am realizat măsurătorile pentru  $I_a = 100$  mA, reținînd valorile temperaturii și a cuplului de frinare ale dispozitivului, în condiții de lungă durată în regim de alunecare.

Rezultatele acestor măsurători sînt prezentate în tabelul 16 și reprezentate grafic în Figura 52, cu mențiunea că măsură-

TABELUL 16: Regimul termic al frinei de 0,1 daN.m.

t/min./	0	5	10	15	20	25	40	50	55	65	70
M/daN.m/	0,135	-	-	-	0,13	0,125	-	-	-	-	0,12
$\theta$ /°C/	24	36	45	52	60	65	73	84	86	91	92

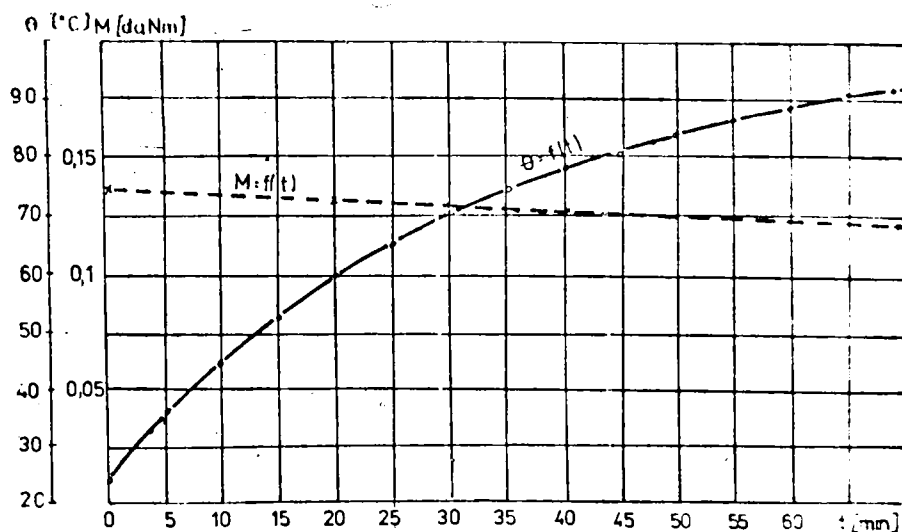


Fig.52. Comportarea termică a frinei de 0,1 daN.m.

riile au fost efectuate pînă în momentul în care bobina de excitație a fost distrusă, aceasta pentru a putea verifica valoarea limitei termice în condiții de exploatare. La o valoare a temperaturii de  $92^{\circ}\text{C}$ , în condițiile de experimentare prezentate, circuitul bobinei de excitație s-a întrerupt, cuplul de frînare devenind zero. În acest fel, pentru încercările ulterioare, am ținut cont de valoarea acestei temperaturi, la experimentările efectuate în condiții identice, în așa fel încît temperatura limită să nu fie depășită și să nu ducă la distrugerea bobinei de excitație.

Pentru a stabili modul în care, funcționarea în regim de lungă durată (peste o oră de funcționare), influențează asupra cuplului de frînare transmis, am efectuat această încercare utilizînd pulbere din import, tipul 410 L, pînă în momentul întreruperii bobinei de excitație.

Cu toate că, ne așteptam ca întreruperea bobinei de excitație să se producă la o valoare de aproximativ  $105 - 110^{\circ}\text{C}$ , considerînd clasa de izolație A, luînd în considerare faptul că temperatura maximă a bobinei de excitație în cazul maginilor electrice de inducție se atinge la  $1/3$  din distanța dintre întrefier și bobină, conform rezultatelor experimentale obținute rezultă că la mijlocul bobinei, temperatura este cu cel puțin  $10^{\circ}\text{C}$  mai mare.

După cum se poate observa din tabelul 16 și figura 52, cuplul de frînare scade după circa  $1\ 1/4$  ore de funcționare, de la valoarea de  $0,135$  daN.m la valoarea de  $0,12$  daN.m, ceea ce ne duce la concluzia că e necesar să ținem cont și de regimul termic de funcționare al frinei. Se constată că, în regim de alunecare de lungă durată, caracteristica mecanică se va modifica, valorile de calculare ale cuplului fiind nesemnificative în domeniul de lucru impus, dar, totuși trebuie luate în considerare.

Repetarea acestor măsurători, după rebobinarea bobinei de excitație, prin utilizarea unui ventilator electric suplimentar pentru răcirea dispozitivului, după circa trei ore de funcționare, a dus la o temperatură maximă a acestuia în condițiile menționate de  $85^{\circ}\text{C}$ , iar valoarea cuplului de frînare a scăzut de la  $0,135$  daN.m la  $0,13$  daN.m., ceea ce ne duce la concluzia că, asigurînd condiții de răcire eficiente, dispozitivele de frînare proiectate pot funcționa în regim de lungă durată, valoarea cuplului de frînare menținîndu-se constantă.

Efectuînd încercări experimentale și cu pulberea preparată în laborator, domeniul de variație al temperaturii se menține ace-

lași, dar scăderea cuplului este mai accentuată, adică acesta scade de la 0,085 la 0,07 daN.m. Acest lucru ne duce la concluzia că proprietățile magnetice ale pulberii preparată scad mai puternic cu creșterea temperaturii față de pulberile din import.

### 5.1.2. Incercări experimentale pentru $\delta = 0,8$ mm.

Pentru efectuarea măsurătorilor, după rebobinarea bobinei de excitație, am prelucrat statorul (poziția 6 din figura 33) la cotele întrefierului de 42,4 mm și 37,6 mm, asigurând în acest fel un întrefier de 0,8 mm. Verificarea cotelor impuse s-a făcut foarte atent, precum și respectarea condițiilor de concentricitate între cele două laturi ale întrefierului. De asemenea, rotorul frinei (poziția 7 din figura 33) a fost prevăzut cu orificii de trecere și decupări longitudinale pentru a asigura posibilitatea scurgerii pulberii și în întrefierul interior, încă la determinările din § 5.1.1., iar la determinarea coeficientului de umplere volumetrică  $k_{uv}$ , am ținut cont și de aceste cavități.

#### 5.1.2.1. Caracteristica statică $M = f(I_e)$ .

Ca și în cazul anterior, la determinarea acestei caracteristici, s-a utilizat pulbere din import tip P 8 (U.S.S.) și pulberea preparată în laborator, la diferiți coeficienți de umplere ai întrefierului  $k_{uv}$ . De asemenea, am urmărit variația temperaturii la nivelul exterior al bobinei de excitație, rezultatele experimentale fiind prezentate în tabelul 17 și figura 53.

TABELUL 17: Variația  $M = f(I_e)$  pentru diferite valori  $k_{uv}$ .

$I_e$ /mA/	0	20	40	60	80	100	120	140	
M /daN.m/	$k_{uv}=0$	0	0	0	0	0,005	0,01	0,015	0,02
	$k_{uv}=0,2$	0	0	0	0,005	0,025	0,04	0,045	0,05
	$k_{uv}=0,4$	0	0,005	0,005	0,03	0,05	0,07	0,085	0,09
	$k_{uv}=0,6$	0	0,01	0,025	0,03	0,075	0,1	0,115	0,12
	$k_{uv}=0,8$	0	0,025	0,05	0,075	0,1	0,13	0,14	0,145
	$k_{uv}=1$	0,01	0,035	0,06	0,09	0,115	0,14	0,15	0,155

Si în acest caz, am observat că, temperatura dispozitivului este mai accentuată în cazul umplerii complete a întrefierului cu pulbere, la umpleri mai mici, valorile fiind comparabile

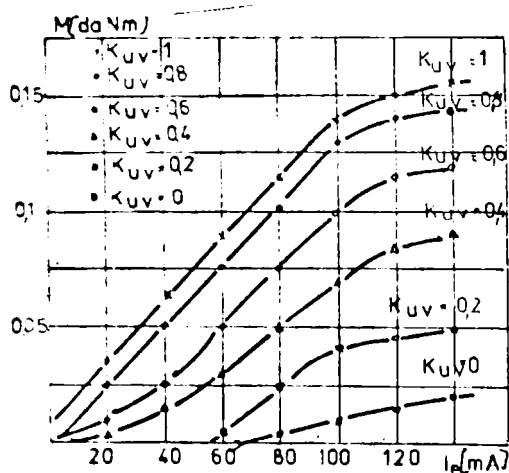


Fig.53. Caracteristica statică la FEP de 0,1 daN.m cu pulbere tip P 8.

cu cele ale întrefierului de 0,6 mm. Se observă o foarte ușoară scădere a cuplului de frinare, în special la coeficienți de umplere reduși cu pulbere.

Din graficul reprezentat în figura 53, rezultă un domeniu linear al caracteristicii statice pe un interval mai larg al curentului de excitație și, mai mult, urmărind variația temperaturii se observă că aceasta e cu câteva procente mai mică, în afară de încercarea la  $k_{uv} = 1$ . Din analiza

rezultatelor experimentale, față de  $\delta = 0,6$  mm, se poate observa că la  $k_{uv} = 0,8$  se obțin cele mai bune rezultate, ca și în cazul din  $\S$  5.1.1. De asemenea, nu s-au observat "agățări" de natură mecanică și nici zgomote datorate unor frecări mecanice chiar la viteze de rotație reduse, ceea ce arată că din punct de vedere constructiv, nu există abateri de la concentricitate care să ducă la uzura pieselor prin atingere.

Pentru cazul pulberii preparată în laborator, rezultatele experimentale obținute pentru  $n = 750$  rot/min. și în aceleași condiții ca la  $\S$  5.1.1., sînt prezentate în tabelul 18 și figura 54, de unde se poate observa că, la întrefier de 0,8 mm, pentru

TABELUL 18: Variația  $M = f(I_e)$  pentru diferite valori  $k_{uv}$ .

$I_e$ /mA/	0	20	40	60	80	100	120	140	
M /daN.M/	$k_{uv}=0$	0	0	0	0,005	0,01	0,015	0,02	
	$k_{uv}=0,2$	0	0	0	0,01	0,02	0,03	0,035	
	$k_{uv}=0,4$	0	0	0,005	0,015	0,03	0,04	0,045	
	$k_{uv}=0,6$	0	0	0,005	0,02	0,035	0,055	0,06	0,065
	$k_{uv}=0,8$	0	0,005	0,015	0,035	0,055	0,07	0,075	0,08
	$k_{uv}=1$	0,01	0,015	0,025	0,045	0,065	0,08	0,085	0,09

coeficienți de umplere  $k_{uv}$  de 0,6, 0,8, 1,0, apare o oarecare scădere a cuplului de frinare față de cazul  $\delta = 0,6$  mm, dar această reducere nu este semnificativă, având valori între 0,01 și 0,02 daN.m.

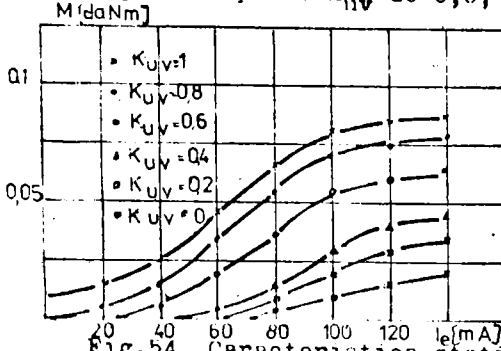


Fig. 54. Caracteristica statică la FEP de 0,1 daN.m cu pulbere preparată în laborator.

Deoarece, pulberea preparată în laborator, are proprietăți magnetice reduse în raport cu pulberile din import, obținerea ei făcându-se din oțel obișnuit, valoarea cuplului de

frinare rezultă mai mică decât în cazul utilizării pulberilor din import și la un întrefier mai mare de 0,6 mm.

Totuși, din caracteristica reprezentată în figura 54, non liniară de creștere a curentului de excitație este destul de mare.

#### 5.1.2.2. Caracteristica mecanică $n = f(M)$ .

Incercărilor experimentale pentru determinarea caracteristicii mecanice s-au efectuat în aceleași condiții, plecând de la viteza de rotație de 100 rot/min., până la valoarea de 1600 rot/min., rezultatele obținute fiind prezentate în tabelul 19 și figura 55 pentru pulbere din import tip P 8 (U.R.S.S) și în tabelul 19 și figura 56, pentru pulberea preparată în laborator,  $I_e$  fiind măsurat în mA.

TABELUL 19: Variația  $n = f(M)$  pentru diferite valori ale curentului de excitație  $I_e$ .

n /rot/min./		100	200	600	1000	1200	1400	1500	1600
M /daN.m/	$I_e=20$	0,025	0,025	0,025	0,03	0,025	0,025	0,02	0,01
	$I_e=40$	0,05	0,045	0,05	0,05	0,05	0,05	0,043	0,03
	$I_e=60$	0,075	0,075	0,075	0,085	0,075	0,075	0,065	0,06
	$I_e=80$	0,1	0,105	0,095	0,1	0,1	0,1	0,09	0,08
	$I_e=100$	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,115	0,105
	$I_e=120$	0,14	0,14	0,145	0,14	0,14	0,135	0,13	0,12

Incercărilor experimentale pentru ridicarea caracteristicii mecanice s-au efectuat la un coeficient de umplere cu pulbere

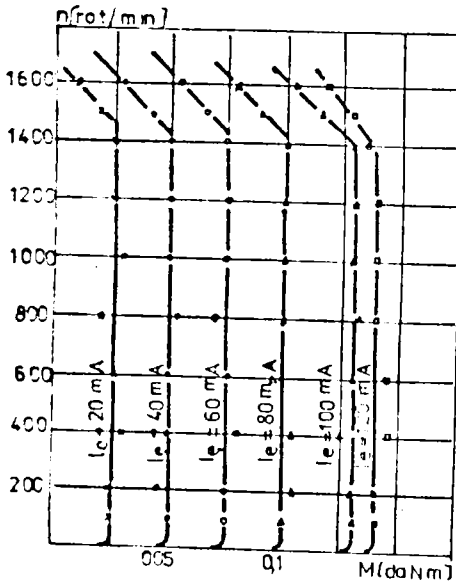


Fig. 55. Caracteristica mecanică la FEP de 0,1 daN.m cu pulbere din import, tip P 8.

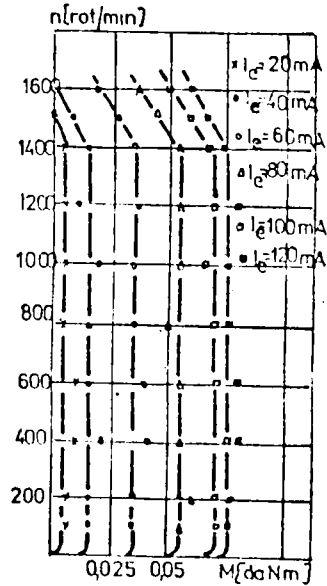


Fig. 56. Caracteristica mecanică la FEP de 0,1 daN.m cu pulbere preparată în laborator.

TABLELUL 20: Variația  $n = f(M)$  pentru diferite valori ale curentului de excitație  $I_e$

$n$ /rot./min./	100	200	600	1000	1200	1400	1500	1600
$M$ /daN.m/	$I_e=20$	0,005	0,005	0,01	0,005	0,005	0,005	0
	$I_e=40$	0,015	0,015	0,015	0,02	0,01	0,015	0,01
	$I_e=60$	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,025
	$I_e=80$	0,055	0,06	0,055	0,055	0,055	0,055	0,045
	$I_e=100$	0,07	0,07	0,07	0,065	0,07	0,07	0,06
	$I_e=120$	0,075	0,075	0,08	0,075	0,08	0,075	0,065

teoretic  $k_{uv} = 0,8$  al întrefierului, pentru a obține unele concluzii privind influența mărimii întrefierului în condiții identice ale compoziției și densității amestecului de umplere.

Analizând caracteristicile mecanice din figura 55, se poate observa că între salturile de curent (treapta aplicată la intrare) și variațiile cuplului la diferite viteze de rotație, sal-

tul acestuia este aproximativ constant (0,025 daN.m pentru  $I_e = 20$  mA), cu excepția ultimei trepte, la care probabil are loc o saturație mai rapidă a circuitului magnetic și a amestecului de umplere din întrefier.

De asemenea, se poate observa că la  $\delta = 0,8$  mm, cuplul de frinare se menține constant la viteze de rotație mai mici decât în cazul  $\delta = 0,6$  mm, valoarea vitezei de scădere a cuplului fiind cuprinsă între 1390 și 1460 rot/min., iar la  $\delta = 0,6$  mm variind între 1420 și 1500 rot/min.

În cazul pulberii preparată în laborator, comparând caracteristica obținută cu cea de la  $\delta = 0,6$  mm, se observă că vitezele limită de scădere a cuplului au valori mai mici, ceea ce se poate concluziona că "fixarea" particulelor de pulbere este influențată de mărimea întrefierului.

Față de cazul întrefierului de 0,6 mm, din figura 56 se poate observa o comportare mai bună a pulberii preparată în laborator, păstrându-se un paralelism aproape constant între caracteristicile mecanice, cu excepția caracteristicii pentru  $I_e = 100$ .

#### 5.1.2.3. Comportarea termică a frinei.

Încercările experimentale s-au efectuat pentru un coeficient de umplere teoretic  $k_{uv} = 0,8$  al întrefierului cu pulbere, la un curent de excitație  $I_e = 100$  mA, cu precauția de a nu depăși valoarea temperaturii măsurate la nivelul exterior al bobinei de excitație de  $90^\circ\text{C}$ , deoarece la încercările din § 4.1.1. aceasta s-a întrerupt, fiind necesară înlocuirea ei. Rezultatele obținute în urma măsurătorilor sînt prezentate în tabelul 21 și figura 57, pentru o viteză de rotație  $n = 750$  rot/min., la un curent de excitație  $I_e = 100$  mA, cu pulbere tip P 8 (U.R.S.S.).

TABELUL 21: Regimul termic al frinei de 0,1 daN.m.

t/min./	0	5	10	15	20	30	35	40	45	50	55	60	65	70
M/daN.m/	0,13	-	-	-	0,125	-	-	-	0,12-	-	-	-	-	0,115
$\theta/^\circ\text{C}/$	24	33	42	49	55	61	70	74	77	80	83	84	85	86

Analizînd figura 57, se poate observa un schimb termic destul de bun al dispozitivului cu exteriorul, temperatura de  $90^\circ\text{C}$ , care devine periculoasă, atîngîndu-se în timpul experimentărilor, după un interval de timp de peste 80 de minute, scăderea momentului de frinare nefiînd semnificativă. Se desprinde conclu-



zile, prin asigurarea unor condiții de răcire adecvate, dispoziti-

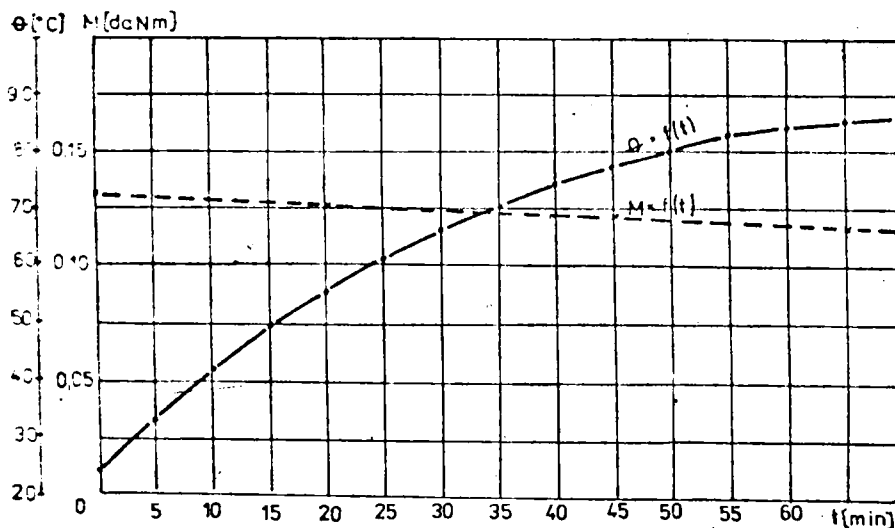


Fig.57. Comportarea termică a frânei de 0,1 daN.m.

val poate funcționa timp îndelungat, cuplul de frinare depinzând în limite reduse de creșterea temperaturii.

### 5.1.3. Incercări experimentale pentru $\delta = 1$ mm.

După modificarea întrefierului, prin prelucurarea statorului (poziția 6 din figura 33), am procedat la efectuarea aceluiași experiment, modificând cantitatea de pulbere introdusă în întrefier, valoarea teoretică a volumului întrefierului fiind în acest caz de  $3,1 \text{ cm}^3$ .

Considerând că cele două încercări anterioare, cu pulbere preparată din oțel obișnuit, sînt concludente asupra influenței compoziției pulberii în raport cu cuplul de frinare, încercările pentru  $\delta = 1$  mm s-au efectuat numai cu pulbere din import, tip 410 L (Austria). Aceste încercări și cele ce vor urma s-au efectuat numai cu pulbere din import, pe motivul că, obținerea în condiții de laborator a unor cantități de pulbere mari este foarte costisitoare, iar obținerea de minereu care conține fier pur este limitată.

#### 5.1.3.1. Caracteristica statică $M = f(I_g)$ .

Pentru o bună comparație a rezultatelor experimentale, încercările s-au efectuat la aceeași viteză de rotație  $n = 750 \text{ rot/min.}$ , la diferiți coeficienți de umplere cu pulbere, calculați teoretic. Rezultatele obținute sînt prezentate în tabelul 22 și

TABELUL 22: Variația  $M = f(I_e)$  pentru diferite valori  $k_{uv}$ .

$I_e$ /mA/		0	20	40	60	80	100	120	140
M /daN.m/	$k_{uv}=0$	0	0	0	0	0	0,005	0,01	0,015
	$k_{uv}=0,2$	0	0	0	0,015	0,035	0,04	0,04	0,045
	$k_{uv}=0,4$	0	0,005	0,01	0,02	0,04	0,065	0,075	0,08
	$k_{uv}=0,6$	0	0,01	0,02	0,045	0,068	0,095	0,105	0,11
	$k_{uv}=0,8$	0	0,02	0,04	0,065	0,09	0,115	0,13	0,135
	$k_{uv}=1$	0,005	0,025	0,05	0,075	0,105	0,125	0,14	0,145

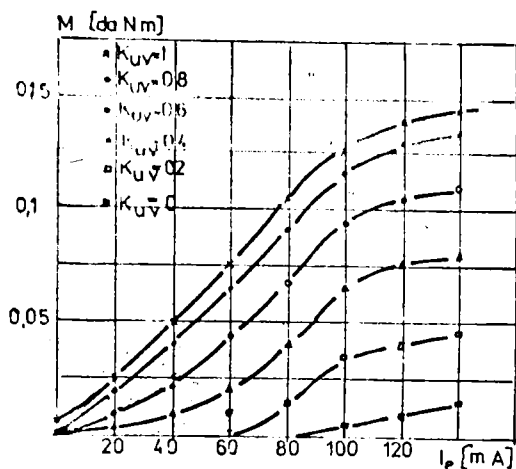


Fig.58. Caracteristica statică la FLP de 0,1 daN.m cu pulbere tip 410L.

figura 58.

Analizând rezultatele experimentale obținute, se constată că valoarea cuplului de frinare este mai mică decât pentru întrefier de 0,8 mm, încălzirea di pozitivului fiind comparabilă, cu excepția încercărilor la  $k_{uv} = 1$ , unde am observat o creștere mai accentuată a temperaturii.

Dacă analizăm mai atent rezultatele experimentale obținute pentru  $\delta = 0,1$  mm și  $\delta = 0,8$  mm, se poate vedea că valoarea cuplului

de frinare la valori mici ale curentului de excitație este comparabilă. Dar, la  $\delta = 1$  mm, valoarea cuplului de frinare obținută experimental, este mai mică decât în cazurile anterioare. O explicație probabilă, ar fi aceea că, efortul tangențial scade odată cu creșterea întrefierului sau, pătrunderea cimpului electromagnetic pe lungimi mai mari este mai redusă.

În cazul încercărilor experimentale la  $k_{uv} = 0,8$ , am modificat valoarea curentului de excitație pentru un timp scurt la 220 mA, dar valoarea cuplului nu a depășit 0,15 daN.m. Comparând rezultatele cu cele din cazul întrefierului de 0,8 mm, unde pentru  $I_e = 120$  mA valoarea cuplului era de 0,15 daN.m se constată faptul că, mărind valoarea întrefierului, saturația circuitului magnetic

și a pulberii se va produce la curenți de excitație mai mari.

Din caracteristicile statice prezentate în figura 58 se poate observa că zona liniară a acestora, pentru  $\delta = 1$  mm se menține în limitele de variație ale curentului de excitație  $I_e$  de la 20 mA la 120 mA, ca și în cazul întrefierului de 0,8 mm, o plași relativ mare de comandă.

### 5.1.3.2. Caracteristica mecanică $n=f(M)$ .

Determinarea caracteristicilor mecanice pentru  $\delta = 1$  mm s-a făcut în aceleași condiții ca și cele prezentate anterior, cu modificarea vitezei de rotație între 100 și 1600 rot/min., la un coeficient  $k_{uv} = 0,8$  teoretic, modificând valoarea curentului de excitație între 0 și 120 mA, rezultate prezentate în tabelul 23 și figura 59.

TABELUL 23: Variația  $n = f(M)$  pentru diferite valori ale curentului de excitație  $I_e$

n /rot./min./		100	200	600	1000	1200	1400	1500	1600
M /daN.m/	$I_e=20$	0,02	0,02	0,02	0,015	0,02	0,02	0,015	0,005
	$I_e=40$	0,04	0,04	0,045	0,04	0,035	0,04	0,035	0,025
	$I_e=60$	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,06	0,05
	$I_e=80$	0,09	0,09	0,09	0,085	0,09	0,09	0,08	0,06
	$I_e=100$	0,115	0,115	0,11	0,115	0,115	0,115	0,105	0,095
	$I_e=120$	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,12	0,11

Se poate observa, urmărind figura 59, că valoarea cuplului de frinare este constantă oină la valori ale vitezei de rotație cuprinse între 1400 și 1440 rot/min., mai mici, la valori ale curentului de excitație mai mari.

Comparând caracteristica mecanică din figura 59 cu cea din figura 55, se constată că salturile curentului de excitație dau caracteristici aproape paralele la aceeași valoare a diferenței de cuplu, ceea ce nu s-a putut realiza cu un întrefier de 0,6 mm, comparația făcându-se cu figura 55.

Deosebirea esențială între cazul întrefierului de 0,8 mm și de 1 mm este aceea că, în primul caz, la același curent de excitație se obține un cuplu de frinare mai mare. Acest lucru ne duce la concluzia că, întrefierul optim la același coeficient de umplere teoretic cu amestec de umplere al întrefierului are valoarea de

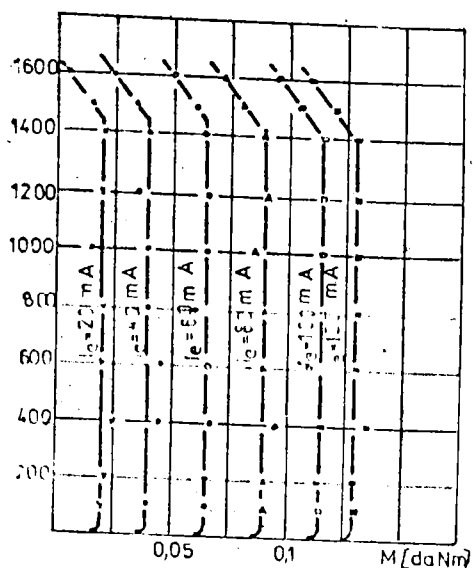


Fig. 59. Caracteristica frecvenței în FEP de 0,1 daN.m cu pulbere tip P 8.

0,8 mm, deoarece pentru cazul  $\delta = 0,6$  mm, realizarea concentricității între stator și rotor (în raport cu condițiile în care s-a executat dispozitivul experimentat) impune utilizarea unor mașini unelte de precizie ridicată și personal calificat.

5.1.3.3. Comportarea termică a frinei.

Cu mențiunea că, obținerea pulberii feromagnetice în condiții de laborator, fără a dispune de instalații speciale este foarte laborioasă, această caracteristică a-a efectuat cu pulbere din import, tip P (U.R.S.S.).

Experimentările s-au făcut la un coeficient de umplere teoretic  $k_{uv} = 0,8$  și la un curent de excitație  $I_e = 100$  mA, menținând constantă viteza de rotație la 750 rot/min.

Prin efectuarea unei încercări în aceleași condiții, dar la o viteză de rotație de 1200 rot/min, am constatat că temperatura dispozitivului pe același domeniu de lucru, este mai mare cu circa  $5^{\circ}\text{C}$ , ceea ce ne duce la concluzia că, pentru viteze de rotație reduse și temperatura dispozitivului va fi mai mică.

Rezultatele experimentale obținute sînt prezentate în tabelul 24 și figura 60.

TABELUL 24: Regimul termic al frinei de 0,1 daN.m.

t /min./	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70
M /daN.m/	0,115	-	-	-	-	-	-	0,11	-	-	-	-	-	0,105
$\theta$ / $^{\circ}\text{C}$ /	24	27	33	38	45	51	56	61	67	70	73	75	77	80

Ca și în cazul întrefierului de 0,8 mm, se poate observa din figura 60 un foarte bun schimb termic, cu creșteri mai importante ale temperaturii la începutul intervalului.

Stabilitatea cuplului de frinare este bună în funcție de temperatură.

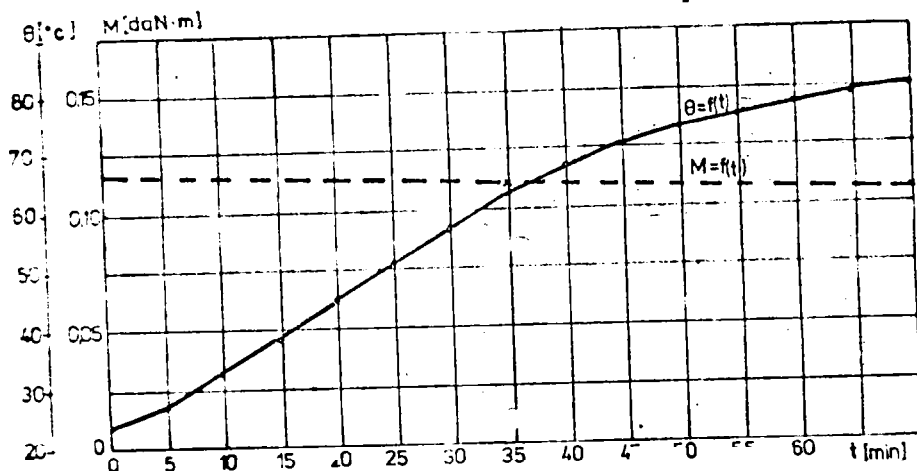


Fig.60. Comportarea termică a frinei de 0,1 daN.m.

#### 5.1.4. Dependența principalelor parametri ai frinei de materialele de execuție

Decarece, din încercările anterioare, reiese faptul că valoarea optimă a întrefierului este de 0,8 mm (valoare realizabilă tehnologic pe mașini unelte obșnuite), am procedat la modificarea calității unor materiale pentru executarea anumitor părți. Astfel, am executat un nou stator (poziția 6 din figura 33) pentru a asigura cele două întrefieruri de 0,8 mm, din același material ca și în încercările anterioare, adică OL 52.2k. Pe lângă aceasta, am executat din aluminiu scuturile laterale (pozițiile 2 și 10 din figura 33) și am montat peste stator un radiator din aluminiu prevăzut cu aripioare de răcire, executat din două buciți și fixat cu șuruburi pe stator.

În această variantă, arborele de sprijin 1 nu a mai fost executat separat, ci, făcând corp comun cu poziția 2, modificându-i diametrul de la 8 la 14 mm.

În cadrul încercărilor experimentale am urmărit caracteristica mecanică  $n = f(M)$  și comportarea termică a frinei la funcționare în regim de alunecare de lungă durată.

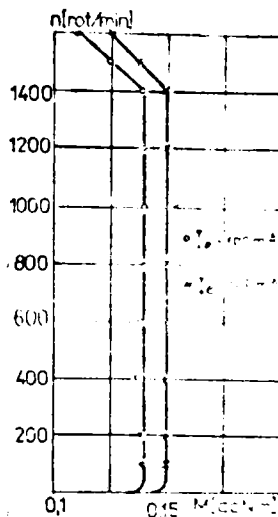
##### 5.1.4.1. Caracteristica mecanică $n = f(M)$ .

Pentru un curent de excitație  $I_0 = 100$  și 120 mA, la o valoare a coeficientului de umplere  $k_{uv} = 0,8$ , rezultatele experimentale obținute sînt redată în tabelul 25 și reprezentate grafic în figura 61, cu mențiunea că s-a utilizat pulbere tip 410L.

**TABELUL 25:** Variația  $n = f(M)$  pentru frina de 0,1 daN.m, la modificarea calității unor materiale de execuție.

n /rot/min/		100	200	600	1000	1200	1400	1500	1600
M /daN.m/	$I_e=100$	0,14	0,14	0,135	0,14	0,14	0,14	0,125	0,11
	$I_e=120$	0,15	0,15	0,145	0,155	0,15	0,15	0,14	0,125

Urmărind caracteristica mecanică din figura 61 și comparînd-o cu cea din figura 55, se poate observa o oarecare creștere a cuplului de frinare, circa 0,01 daN.m, valoare ne semnificativă. Acest lucru era normal, deoarece circuitul magnetic propriu-zis (pozițiile 6 și 7 din figura 33) au rămas la aceeași calitate a materialului de execuție. S-a observat totuși o rezervă la atingerea saturației circuitului magnetic, care este atinsă la valori ale curentului de excitație în jur de 160 mA.



**Fig. 61.** Caracteristica mecanică la modificarea calității unor materiale.

**5.1.4.2. Comportarea termică a frinei.**

Condițiile de efectuare a măsurătorilor au fost:

- pulbere din import, tip 410L (Austria);
- coeficient de umplere teoretic  $k_{uv} = 0,8$ ;
- viteza de rotație  $n = 750$  rot/min.;
- curent de excitație  $I_e = 100$  mA.

În urma măsurătorilor am obținut rezultatele prezentate în tabelul 26 și figura 62 cu mențiunea că, măsurătorile s-au făcut la intervale de 7,5 minute.

**TABELUL 26:** Regimul termic al frinei de 0,1 daN.m la modificarea calității unor materiale de execuție.

n /rot/min/	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165
M /daN.m/	0,14	-	-	0,135	-	-	-	0,13	-	-	0,125	-
$\theta$ /°C/	24	36	45	53	61	67	72	77	80	82	84	86

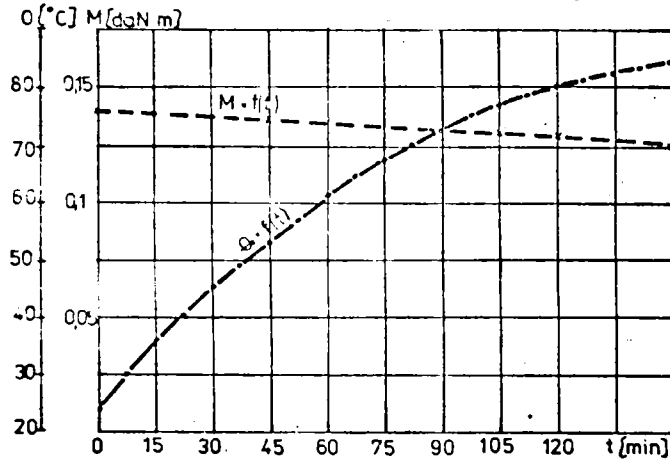


Fig.62. Comportarea termică a frinei de 0,1daN.m la modificarea calității unor materiale de execuție.

Se poate observa, în acest caz, un schimb termic foarte bun, temperatura la exteriorul bobinei atingând valoarea de 86°C, valoarea atinsă în cazul § 5.1.2. după circa 160 minute, adică  $\approx 3$  ore, ceea ce nu era posibil în vechea variantă.

O primă concluzie, în urma acestor rezultate experimentale, este aceea că, executând unele repere ce nu participă efectiv la realizarea circuitului magnetic propriu-zis al dispozitivului din materiale cu coeficient de cedare a căldurii ridicat și, prevăzând radiatoroare de răcire suplimentare, se pot realiza dispozitive de frinare cu funcționare îndelungată în regim de alunecare, la un cuplu de frinare constant.

După cum se poate observa din figura 62, după circa 3 ore de funcționare în regim de alunecare al frinei, valoarea cuplului de frinare a scăzut doar cu 0,015 daN.m, ceea ce în procente reprezintă sub 5% din valoarea cuplului nominal.

#### 5.1.5. Discuții I

Analizând rezultatele experimentale obținute, comparativ cu cerințele impuse la FMP de 0,1 daN.m prin proiectare, se observă o foarte bună concordanță a acestora.

De asemenea, după cum s-a putut observa, la încercările efectuate cu pulbere preparată în laborator, performanțele dispozitivului sînt limitate, ceea ce ne arată că aceste performanțe depind foarte mult de compoziția amestecului de umplere și calitatea acestuia.

a. Caracteristica statică  $M = f(I_e)$  este aproape liniară, cu excepția porțiunilor de început și sfîrșit, cînd apare fenomenul de saturație. Comparativ, pentru cele trei întrefieruri, în figura 63 s-au reprezentat caracteristicile statice la o viteză de rotație de 750 rot/min. și la un coeficient de umplere al întrefierului teoretic  $k_{uv} = 0,8$ .

Observînd cele trei caracteristici din figura 63, se poate

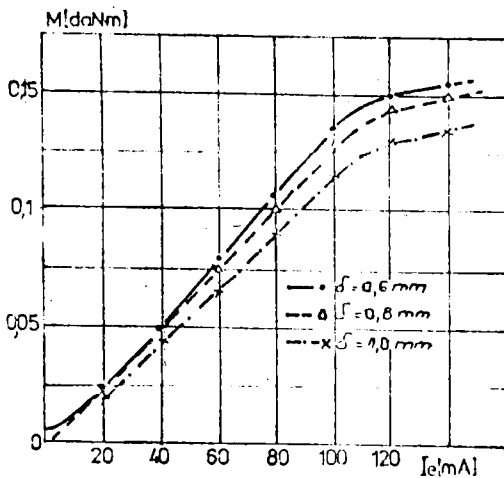


Fig. 63. Caracteristicile statice ale frînei de 0,1 daN.m la  $\delta = 0,6$ ;  $\delta = 0,8$  și  $\delta = 1$  mm.

de  $\delta = 0,8$  mm și scăderea cu circa 0,015 daN.m în cazul  $\delta = 1$  față de  $\delta = 0,8$  mm, ne ducă la concluzia că valoarea optimă a întrefierului este de 0,8 mm, pentru dispozitive de frînare cu rotor de mică inerție și cuplu de frînare redus. Din considerente de ordin tehnologic, în cazul acestor dispozitive, optez pentru un întrefier de 0,7 - 0,9 mm, realizabil pe mașini unelte obișnuite.

Cu mențiunea că, la  $\delta = 0,6$  mm s-au observat anumite zgomete metalice, datorate unor frecări interioare între rotor și stator, din cauza unei concentricități imperfecte între acestea, optăm pentru varianta cu  $\delta = 0,8$  mm, care asigură și un cuplu de frînare apropiat de cel impus prin tema de proiectare și prezintă o caracteristică aproape liniară pe domeniul de variație al curentului de excitație.

b. Caracteristica mecanică  $n = f(M)$ , în cazul celor trei măsurători, pentru un curent de excitație constant este o dreaptă, adică momentul de frînare nu depinde de viteza de rotație

vegea  
că, între acestea există un paralelism aproape perfect.

Aspectul liniar al caracteristicilor statice are un domeniu destul de mare, ceea ce ne duce la concluzia că pentru valorile calculate ale înălțimii în întrefier, mai există o anumită rezervă.

Cresterea aproape nesemnificativă a cuplului de frînare, pentru condițiile de experimentare prezentate (circa 0,005 daN.m la  $I_e = 100$  mA pentru  $\delta = 0,6$  mm față



pînă la o anumită valoare limită, apropiată de viteza de rotație nominală luată în calcule, cînd cuplul de frinare începe să scadă rapid.

Reunind cele trei caracteristici mecanice, pentru un curent de excitație de 100 mA, la un coeficient de umplere al întrefierului  $k_{uv} = 0,8$ , utilizînd pulbere din import, acestea arată ca în figura 64.

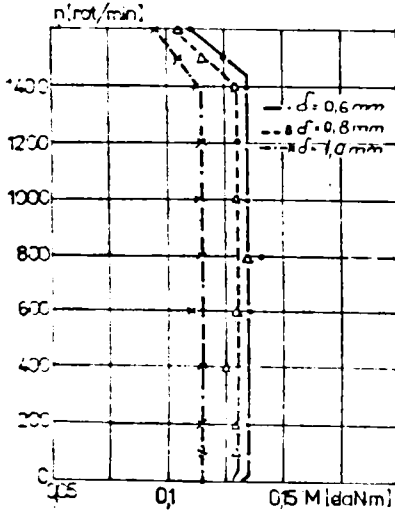


Fig.64. Caracteristicile mecanice ale FEP de 0,1 daNm pentru  $\delta=0,6; 0,8$  și 1 mm.

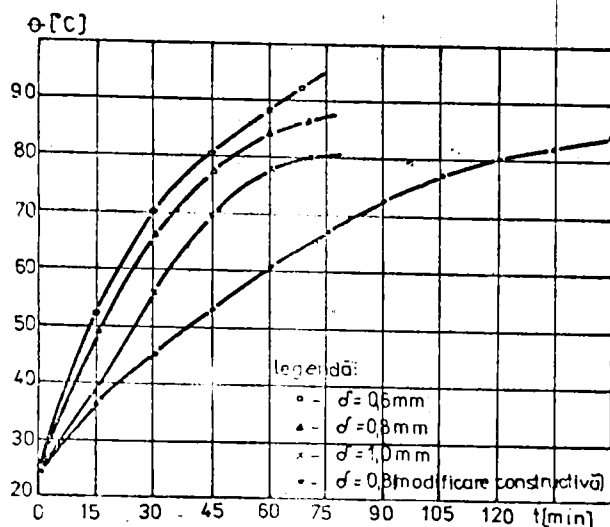
Analizînd cele trei caracteristici se poate observa o creștere nesemnificativă a cuplului pentru  $\delta = 0,6$  mm față de  $\delta = 0,8$  mm. Viteza limită de scădere a cuplului de frinare este puțin mai mare decît pentru  $\delta = 0,8$  mm, dar, la viteze de rotație mici se observau mici deviații ale cuplului pe balanța de măsură în anumite poziții, ceea ce ne duce la concluzia că pe unele porțiuni ale întrefierului există puncte de contact mecanic între statorul și rotorul frinei.

La creșterea întrefierului de la 0,8 la 1 mm, diferența între valorile cuplului de frinare este sensibilă, iar viteza de rotație limită de menținere constantă a cuplului de frinare scade.

c. Comportarea termică a frinei. Analizînd rezultatele experimentale obținute în § 5.1.1.3, 5.1.2.3, 5.1.3.3 și 5.1.4.2. și reunindu-le pe o singură caracteristică, reprezentată în figura 65, se poate observa că încălzirea frinei este cu atât mai accentuată, cu cît valoarea întrefierului este mai mică, la același coeficient de umplere teoretic cu pulbere. Deoarece, valoarea cuplului de frinare, scade cu creșterea lățimii întrefierului (la aceeași valoare a curentului de excitație  $I_e$ ), se observă că în cazul modificării calității materialelor de execuție ce nu participă la realizarea circuitului magnetic propriu-zis (materiale cu coeficient de cedare al căldurii mai ridicat), frîna poate funcționa în regim de alunecare pe perioade de timp relativ mari.

Datorită faptului că, utilizarea materialelor neferoase

(aluminiu) este limitată; pentru funcționarea în regim de alunecare de lungă durată e necesar să se prevadă condiția suplimentară de răcire, fie utilizând ventilatoare de răcire, fie trimițând



aer rece prin axul rotorului (în acest caz valoarea investiției este mai mare deoarece costul de producție al dispozitivului crește), fie utilizând ca agent de răcire apă recirculată la o anumită presiune și debit, prin canale de răcire în apropierea bobinei de excitație și a întrefierului.

Fig.65. Comportarea termică a frânci de 0,1 daN.m.

d. Comportarea dinamică a frânci, caracteristica  $M=f(t)$

s-a ridicat experimental la o viteză de rotație de 750 rot/min., la un curent de excitație  $I_e = 100$  mA, întrefierul  $\delta = 0,8$  mm și la un coeficient de umplere teoretic cu pulbere  $k_{uv} = 0,2$ .

Prin această încercare, am căutat să determinăm durata regimului tranzitoriu al dispozitivului, adică timpul în care cuplul de frinare ajunge la valoarea stabilizată, regim caracterizat de constanta de timp  $T_M$ .

Deoarece, încercările efectuate cu un cronometru obișnuit au dat rezultate diferite, într-o primă fază am procedat astfel:

- pe unul din brațele mobile ale balanței am fixat un potențiomtru sensibil și am verificat dacă acționarea acestuia nu modifică valoarea cuplului transmis. Influența a fost foarte mică și, de fapt, eram interesați să determinăm timpul de creștere al cuplului la valoarea stabilizată. Potențiomtrul a fost alimentat de la o sursă de 7,5 V c.c. și prin montaj potențiomtric, la cuplarea curentului de excitație al frânci variația tensiunii a fost de aproximativ 5 V;

- am procedat la înregistrarea variației tensiunii în timp și am făcut similitudine între această variație și cea a cuplului de frinare, cu ajutorul unui înregistrator XY-RECORD

endim 020.02 prevzut cu bază de timp (R.D.G.), la care viteza de înregistrare minimă a fost de 1 cm/0,1 ms;

- s-a procedat la pornirea simultană a înregistratorului și alimentarea cu tensiune a bobinei de excitație.

Caracteristica dinamică obținută, după mai multe repetări arată ca în figura 66, cu mențiunea că după prelucrarea rezultatelor, am reținut caracteristica ce dă o valoare medie între cele prelucrate, valoarea tensiunii pe axa Y fiind de 1V/cm.

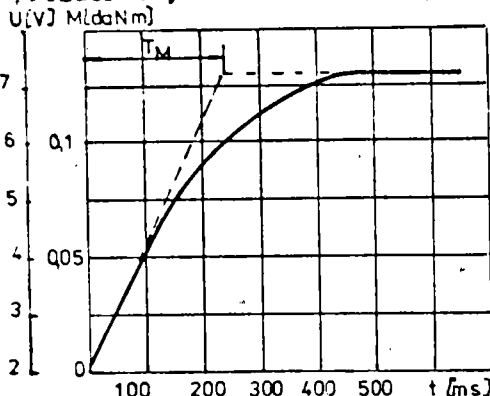


Fig.66. Caracteristica dinamică a frinei de 0,1 daN.m.

Din grafic, se poate observa că valoarea constantei de timp a dispozitivului este  $T_M=240$  ms, o valoare foarte mică dacă luăm în considerare și inerțiile (erorile) introduse la: conectarea înregistratorului și alimentarea bobinei de excitație, eroarea introdusă de potențiomtru prin legătura mecanică cu balanța, eroa-

rea introdusă prin inerția balanței.

În faza a doua, pentru a încerca să verificăm rezultatele obținute cu metoda prezentată, am procedat la utilizarea unui traductor optic prevzut cu dispozitiv de amplificare ce comandă un releu electronic (comutator) cu tiristor și am folosit un cronometru digital tip CRONOMET CN 425, prevzut cu contact de pornire și oprire comandate de la distanță și memorarea timpului de oprire. Butonul de pornire s-a legat în paralel cu butonul de pornire al sursei de excitație, iar cel de oprire și memorare a fost comandat prin releul traductorului fotoelectric, traductor ce a fost poziționat, după mai multe încercări, la valoarea maximă a cuplului de frinare. După mai multe încercări repetate, valoarea maximă a cuplului de frinare s-a atins după un timp ce varia între 350 - 400 ms, ceea ce, după prelucrarea graficilor dă o constantă de timp  $T_M = 240 - 250$  ms, verificându-se în acest fel rezultatele obținute anterior.

Analizând figura 66 și ținând cont că la intrare am aplicat un semnal treaptă (curent sau tensiune de excitație), iar la ieșire obținem tot un semnal treaptă (luând în considerare momen-

tul de frinare), cunoscând valoarea constantei de timp a dispozitivului  $T_M$ , după /9, 27, 34, 35, 51, 52, 56, g.s./, rezultă că funcția de transfer la conectarea dispozitivului este de forma:

$$Y(s) = \frac{M(s)}{I_e(s)} = \frac{k}{T_M \cdot s + 1}, \quad (46)$$

unde:  $k = \Delta M / \Delta I_e$  și  $s = \sigma + j\omega$  - variabilă complexă.

Din analiza relației (46) și trecînd în domeniul timp, rezultă o comportare dinamică de forma:

$$T_M \frac{dM}{dt} + M = k \cdot i_e(t). \quad (47)$$

Rezolvarea acestei ecuații diferențiale, considerînd semnalul de intrare o treaptă unitară, ne duce la concluzia că variația momentului de frinare în raport cu timpul este:

$$M(t) = M_{\max} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T_M}}) \quad (48)$$

Deoarece, valoarea constantei de timp este foarte mică, practic termenul  $e^{-t/T_M}$  influențează foarte puțin comportarea dinamică, aspectul constant al momentului (paralel cu axa timpului), la același curent de excitație menținîndu-se.

Din rezultatele experimentale obținute și datele din literatură, rezultă că timpul de creștere al curentului de excitație la valoarea stabilizată, este dictat de parametrii electrici ai bobinei de excitație ( $R_e$  și  $L_e$ ). Variația curentului de excitație  $I_e$  în raport cu timpul este dată de relație asemănătoare cu (48), adică:

$$i_e(t) = I_{e\max} \cdot (1 - e^{-t/T_e}) \quad (49)$$

cea ce ne arată o comportare dinamică identică cu cea a cuplului, cu precizarea că  $T_e$  reprezintă constanta de timp electrică, adică  $T_e = L_e / R_e = 75$  ms.

Din compararea celor două constante de timp se poate vedea că inerțiile mecanice influențează foarte mult asupra timpului de răspuns al dispozitivului.

Se poate concluziona că FEP au o comportare dinamică similară cu elementele proporționale de ordinul unu, utilizate în sistemele de reglare automată. Cu mențiunea că, stabilirea ecuațiilor dinamice de funcționare pentru cazul unui sistem de acționare cu cuplaj electromagnetic cu pulbere la transmisia unui automobil este prezentat în /52/, a cărei comportare dinamică este

asemănătoare cu a unei frâne, precizăm că timpul de răspuns stabilit experimental al celor două dispozitive (cuplă și frână), /50/ este de același ordin de mărime.

e. Influența tensiunii de alimentare. Deoarece toate încercările anterioare au fost efectuate în curent continuu, utilizând o sursă de tensiune stabilizată, am considerat că e necesar să verificăm aceste rezultate și în curent alternativ. Am reluat o parte din măsurători și am observat că la aceeași valoare efectivă a curentului de excitație la frecvența de 50 Hz nu există nici-un fel de modificare a valorii cuplului de frinare, dar, cum era normal, valoarea tensiunii de alimentare a crescut. De asemenea, tensiunea de alimentare alternativă a influențat foarte puțin asupra constantei de timp  $T_M$ , aceasta având valori puțin mai mici, dar ne semnificative.

Datorită faptului că, magnetismul remanent se menține un timp destul de mare, considerăm că în cazul unor procese rapide, cu conectări și deconectări bruște, este mult mai avantajoasă alimentarea bobinei de excitație în curent continuu, deoarece prin schimbarea polarității tensiunii de alimentare, pentru un timp foarte scurt, se realizează o demagnetizare rapidă a circuitului magnetic și pulberii feromagnetice.

## 5.2. Incercări experimentale pe FEP de 20 daN.m.

Pentru realizarea experimentărilor am utilizat un stand special amenajat la I.M.M.U.M. Baia Mare, folosindu-mă de suportul aferent frinei tip Vibrometer de 60 daN.m, existent în standul de probe al acestei uzine.

Executarea măsurătorilor s-a făcut pentru frâna proiectată în capitolul 4, cu rotor masiv, stator masiv, constructiv diferind de frâna de 0,1 daN.m.

Efectuarea măsurătorilor s-a făcut utilizând următoarele elemente și echipament:

- motovariator de turație cu curele pentru viteze de rotație între 13,8 - 380 rot/min., la un cuplu de 40 daN.m;
- motovariator de turație cu curele pentru viteze de rotație între 500 - 1200 rot/min., la un cuplu de 30 daN.m;
- cuplaje dințate între motovariator și frână;
- balanță 0 - 50 daN, pentru măsurarea cuplului;
- tahometru calculator tip N 2603, pentru măsurarea turației;
- înregistrator tip XY SCHREIBER 622.01, pentru determi-

narea caracteristicii dinamice (R.D.G), cu bază de timp:

- cronometru digital tip CRONOMAT CN 425;
- sursă de tensiune-stabilizată 0 - 40 V c.c.;
- termocuplu miniatură rapid, tip TRD 150, cuplat cu un milivoltmetru regulator tip MR 192p, pentru realizarea protecției termice.

Prezentarea sumară a standului utilizat se poate vedea din vederea generală prezentată în figura 67.

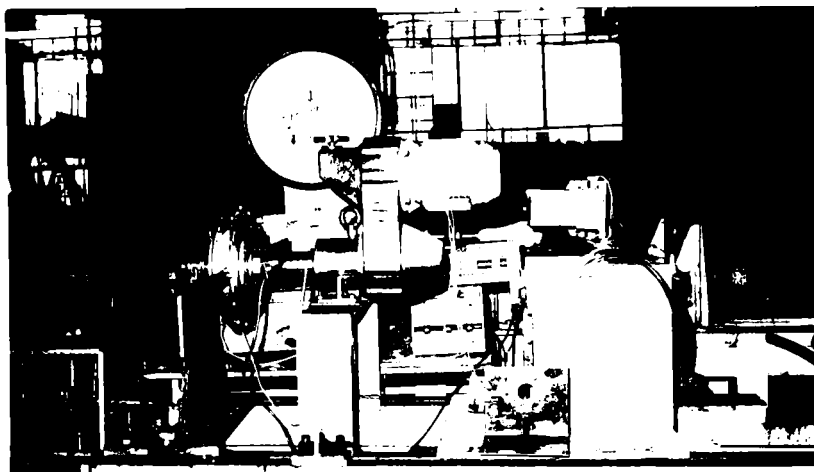


Fig.67. Vedere de ansamblu a standului de probe pentru FEP de 20 daN.m.

Pentru măsurarea cuplului de frinare, am prevăzut două brațe de echilibrare cu lungimea de 500 mm de la axul frinei, unul din brațe fiind așezat pe balanța de măsură. Precizăm că, în rezultatele experimentale prezentate în continuare, sînt redate valorile reale ale cuplului de frinare, și nu valorile forței citite pe balanță.

Deoarece, prin lucrarea /50/ acest dispozitiv a fost proiectat și executat în scopul utilizării la standul de probe din I.M.M.U.M. Baia Mare, pentru încercarea reductoarelor planetare și altor tipuri de reductoare din planul uzinei, experimentele s-au limitat la întrefier de 1 mm și 1,5 mm, ultima variantă fiind

utilizată la încercările produselor executate în uzină, la probele pe timp scurt.

Constructiv, inițial, rotorul și statorul s-au prevăzut prin proiect să fie executate din OT 45, prevăzându-se și un tratament de recoacere pentru omogenizare cu efectuarea analizei chimice asupra conținutului de carbon. Deoarece executarea modelelor pentru turnare este costisitoare, am acceptat ca materialul de execuție al rotorului și statorului să fie oțel laminat marca OL 52.2k, cu conținut garantat de carbon, recalculând datele de proiectare.

Datorită faptului că pe parcursul executării dispozitivului nu a fost urmărită calitatea materialelor de execuție, la efectuarea primei încercări pe stand, valoarea maximă a cuplului de frinare a fost de 11 daN.m în loc de 20 daN.m prevăzută prin tema de proiectare. Efectuând analiza chimică din care a fost executat statorul (Pозиțiile 3, 4 din figura 37), rotorul (poziția 7 din figura 37) și axul rotorului (poziția 1 din figura 37), la analiza chimică a rezultat:

- materialul statorului: OL 42;
- materialul rotorului: OL 37;
- materialul arborelui; OL 25.

În acest caz am procedat la refacerea pieselor din OL 52, rotorul fiind executat inițial la un diametru exterior de 101 mm, pentru realizarea unui întrefier de 1 mm. Cu precizarea că, am efectuat încercări și la viteza de rotație de aproximativ 1 rot/min., cu ajutorul unui motoreductor planetar ce era supus unor probe de duranță, proiectat pentru această viteză, menționăm că valoarea cuplului transmis este aceeași, indiferent de viteza de rotație. Ne-a interesat, în mod deosebit, comportarea mecanică a frinei la viteze de rotație mari, ținând cont de faptul că în acest caz rotorul este executat masiv, iar forțele și viteza la periferia acestuia au valori apreciabile.

Efectuarea încercărilor pe FEP de 20 daN.m s-a făcut utilizând pulbere din import, tip 410L (Austria), pulbere folosită și pentru cele două frine Vibrometer existente în standul de încercări de la I.M.M.U.M. Baia Mare, dispunând de o cantitate suficientă.

Cunoscând, din încercările anterioare efectuate pe frina de 0,1 daN.m, că de cantitatea de pulbere introdusă în întrefier depinde foarte mult valoarea cuplului transmis, am efectuat în-

cercările pentru coeficienți de umplere  $k_{uv}$  aproape de exces, adică volumul de pulbere introdusă în întrefier s-a făcut spre valoarea maximă a volumului întrefierului calculată teoretic.

### 5.2.1. Incercări experimentale pentru $\delta = 1$ mm.

Pentru început, am efectuat o încercare de probă, la o viteză de rotație constantă de circa 1 rot/min. și am urmărit pe aceleași intervale de timp, variația cuplului de frinare și temperatura dispozitivului în funcție de cantitatea de pulbere introdusă, la un curent de excitație constant de 0,5 A. Din aceste încercări am observat, ca și în cazul frinei de 0,1 daN.m, frecări de natură mecanică în anumite porțiuni, precum și o încălzire destul de accentuată la umplerea totală a întrefierului cu pulbere. După demontarea și curățirea frinei am procedat la echilibrarea dinamică a rotorului la 750 rot/min. și am reluat încercările la o viteză de rotație de 500 rot/min. și la coeficienți de umplere teoretici ai volumului întrefierului cu pulbere de: 0,5; 0,7; 0,8; 0,9; 1, măsurarea volumului făcându-se cu un cilindru gradat.

Volumul teoretic calculat al întrefierului în cazul  $\delta = 1$  mm este de  $93 \text{ cm}^3$ .

#### 5.2.1.1. Caracteristica statică $M = f(I_e)$ .

Precizăm că, în cadrul încercărilor, dispozitivul a fost prevăzut cu protecție termică, pentru cazul în care temperatura la mijlocul bobinei de excitație să nu depășească valoarea de  $80^\circ\text{C}$ , prin plasarea unui termocuplu, legat la un milivoltmetru regulator, care, la atingerea acestei temperaturi, dădea comandă pentru decuplarea bobinei de excitație a frinei, precum și deconectarea de la rețea a motorului de antrenare al motovariatorului. Am luat aceste măsuri de precauție, deoarece am reușit cu multă greutate să realizăm carcasa bobinei și nu am vrut să riscăm distrugerea ei la demontări și montări repetate pentru rebobinare.

Pentru executarea încercărilor la determinarea acestei caracteristici, am utilizat un motovariator cu curele, pentru viteze de rotație reglabile între 500 -1200 rot/min.

Rezultatele încercărilor efectuate, sînt prezentate în tabelul 27 și reprezentate grafic în figura 68, pentru diferiți coeficienți de umplere teoretici ai întrefierului cu pulbere.

... sînt prezentate rezultatele experimentale obținute și ob-



servind regimul termic al frinei, ajungem la concluzia că la a-

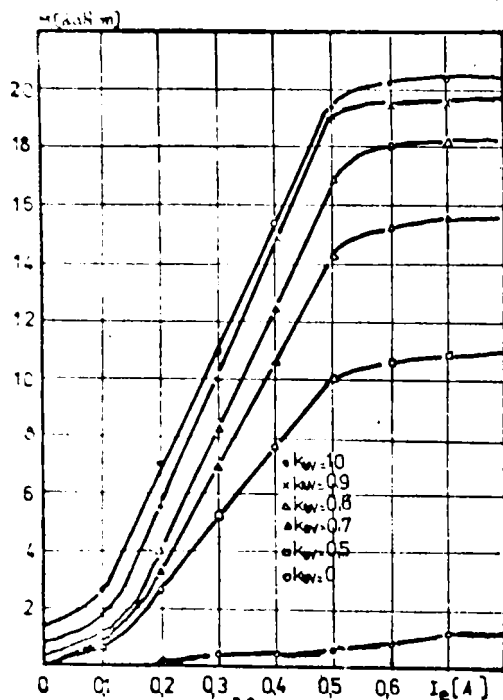


Fig.68. Caracteristica statică la FEP de 20 daN.m cu  $\delta = 1$  mm.

ceastă valoare a întrefierului, umplerea optimă cu pulbere se realizează pentru  $k_{uv} = 0,9$ , deoarece la  $k_{uv} = 1$ , valoarea maximă a momentului de frinare a depășit doar cu 0,8 daN.m valoarea obținută la  $k_{uv} = 0,9$ , dar temperatura dispozitivului a crescut așa de mult încât după circa 30 minute, frâna a fost deconectată. Mai mult, analizând valorile cuplului rezidual, la  $k_{uv} = 1$  acesta reprezintă 7%, iar la  $k_{uv} = 0,9$  reprezintă 4%, valoare ce se poate compara cu a dispozitivelor similare executate în străinătate, care au un cuplu rezidual sub 5%.

TABELUL 27: Variația  $M = f(I_e)$  pentru diferite valori  $k_{uv}$ .

$I_e$ /A/	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	
M /daN.m/	$k_{uv}=0$	0	0	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8	1,2	1,2
	$k_{uv}=0,5$	0	0,6	2,6	4,2	7,6	10	10,6	10,8	11
	$k_{uv}=0,7$	0	0,8	3,2	7	10,6	14,2	15,2	15,5	15,6
	$k_{uv}=0,8$	0,4	1,2	4	8,2	12,4	16,8	18	18,2	18,3
	$k_{uv}=0,9$	0,8	1,8	5,6	10	14,8	19	19,4	19,6	19,7
	$k_{uv}=1,0$	1,4	2,6	7	11	15,4	19,4	20,2	20,4	20,5

Aspectul liniar al caracteristicii statice este bun, încadrându-se între 0,1 - 0,5 A, iar cuplul maxim se obține pentru un curent în jur de 0,7 A, valoare relativ mare care duce la o încălzire excesivă a bobinajului.

Deoarece creșterea cuplului de frinare este foarte mică

pentru curenți de excitație mai mari de 0,5 A (din cauza atingerii saturației circuitului magnetic), considerăm că această valoare este optimă, valoare luată și în calculele de proiectare.

5.2.1.2. Caracteristica mecanică  $n = f(M)$ .

Pentru ridicarea acestei caracteristici am utilizat două motovariatoare cu curele, unul pentru viteze de rotație pînă la 380 rot/min., celălalt pentru viteze de 500 - 1200 rot/min., la un cuplu adecvat încercărilor respective.

Variația momentului în funcție de viteza de rotație este prezentată în tabelul 28 și figura 69, pentru un coeficient de umplere teoretic  $k_{uv} = 0,9$ , la diferite valori ale curentului de excitație.

TABELUL 27: Variația  $n = f(M)$  pentru diferite valori ale curentului de excitație  $I_e$ .

n /rot/min.		100	200	300	500	600	700	800	900	1000
M /daN.m/	$I_e=0,1A$	1,8	2,0	1,9	1,8	1,7	1,8	1,7	1,2	0,2
	$I_e=0,2A$	5,5	5,5	5,6	5,7	5,6	5,6	5,6	5,0	3,6
	$I_e=0,3A$	9,8	10,2	10,2	10,1	10,0	10,0	9,9	9,4	8,0
	$I_e=0,4A$	14,6	14,6	14,7	14,8	14,8	14,8	14,7	14,5	13,2
	$I_e=0,5A$	18,9	18,9	19,0	19,0	18,9	19,0	19,0	19,0	18,0
	$I_e=0,6A$	19,4	19,5	19,5	19,4	19,4	19,3	19,4	19,4	18,6

Analizînd rezultatele obținute pentru caracteristica mecanică se constată un paralelism aproape perfect al salturilor de cuplu în funcție cu salturile curentului de excitație, cu excepția ultimei caracteristici, care este foarte apropiată de cea din cazul curentului de excitație de 0,5 A, aceasta pe motivul că se ajunge la saturația circuitului magnetic.

Ceea ce nu s-a putut vedea atât de bine la încercările frinei de 0,1 daN.m, adică valoarea vitezei de rotație la care cuplul de frinare începe să scadă, se poate observa mai clar la această frînă.

Din figura 69 se observă că scăderea cuplului se produce la viteze de rotații mai mici și curent de excitație redus și crește cu mărirea celor doi parametri, variînd între 850 și 930 rot/min.

Pentru a determina cu erori minime această viteză de scade-

re a cuplului de frinare, în intervalul 800 - 950 rot/min. am făcut citiri la intervale de 10 rot/min. și mai mult, am efectuat o încercare măbind progresiv viteza de rotație și curentul de excitație pentru a menține constantă valoarea cuplului, dar încălzirea dispozitivului este rapidă, ceea ce impune scoaterea sa din funcțiune.

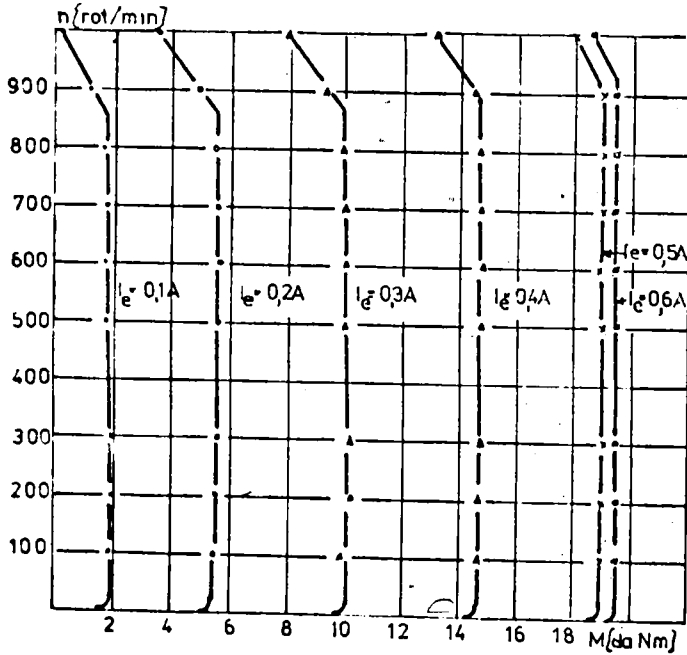


Fig.69. Caracteristica mecanică la FEP de 20 daN.m și  $\delta = 1$  mm.

În conformitate cu rezultatele experimentale obținute, scăderea cuplului se produce astfel: la  $I_e = 0,1$  A,  $n = 850$  rot/min.; la  $I_e = 0,2$  A,  $n = 860$  rot/min.; la  $I_e = 0,3$  A,  $n = 870$  rot/min.; la  $I_e = 0,4$  A,  $n = 890$  rot/min.; la  $I_e = 0,5$  A,  $n = 910$  rot/min., și la  $I_e = 0,6$  A,  $n = 930$  rot/min.

### 5.2.1.3. Comportarea termică a frinei.

Creșterea temperaturii bobinei de excitație, și implicit a discului și de frinare, a fost urmărită în toate încercările anterioare efectuate, dar acestea nu erau semnificative, deoarece timpurile de funcționare erau reduse.

Am efectuat aceste încercări la diferite valori ale curentului de excitație și, după cum era normal, cu cât aceștia sînt mai mici, cu atât creșterea de temperatură în timp este mai redusă. Se înțelege, că la curenți de comandă reduse, valoarea cu-

plului de frinare va avea de asemenea valori reduse.

Deoarece, dispozitivul proiectat și executat pe baza lucrării /50/ a fost prevăzut să funcționeze la un cuplu nominal de 20 daN.m, valoare ce nu s-a putut obține decât la  $k_{UV} = 1$  și curent de excitație de circa 0,6 A (ceea ce duce la o încălzire apreciabilă), comportarea termică a frinei s-a urmărit la un curent de excitație de 0,5 A și un coeficient de umplere teoretic al întrefierului cu pulbere  $k_{UV} = 0,9$ , fiind cuplul de frinare scăzut foarte puțin sub valoarea de 19 daN.m.

Rezultatele încercărilor experimentale sunt prezentate în tabelul 29 și figura 70, pentru viteze de rotație constante de 500, 700 și 900 rot/min. Încercările pentru o viteză de rotație superioară s-au efectuat după rîncirca dispozitivului, pentru ca rezultatele să fie comparabile.

În timpul încercărilor am urmărit și variația momentului de frinare cu timpul, pînă la atingerea temperaturii de 80°C.

TABELUL 29: Regimul termic al frinei de 20 daN.m la  $\delta = 1$  mm.

t /min./		0	5	10	15	20	25	30	35	40
M /daN.m/		19,0	19,0	19,0	18,9	18,9	18,9	18,9	18,8	18,8
$\theta$ /°C/	n=500 rot/min.	17	24	37	47	56	63	69	75	78
	n=700 rot/min.	17	26	40	52	61	67	72	77	-
	n=900 rot/min.	18	29	43	56	63	70	76	79	-

Din rezultatele experimentale obținute, se poate observa că există o anumită influență a vitezei de rotație față de creșterea temperaturii dispozitivului, aceasta fiind mai mare, pentru viteze de rotație mai mari. Deoarece valoarea curentului de excitație este aceeași, ajungem la concluzia că la creșterea vitezei de rotație, în stratul de pulbere feromagnetică din întrefier apar frecări mai intense, care duc la creșterea temperaturii în strat și implicit a dispozitivului.

Atingerea temperaturii de 80°C, măsurată la nivelul bobinei de excitație, se realizează la valori diferite de timp pentru viteze diferite, diferența fiind de circa 6 minute la  $n = 500$  rot/min., și cea de la  $n = 900$  rot/min. Mai exact, această temperatură a fost atinsă astfel: la  $n = 500$  rot/min.,  $t = 42$  minute; la  $n = 700$  rot/min.,  $t = 38$  minute și la  $n = 900$  rot/min.,  $t = 36$  minute.

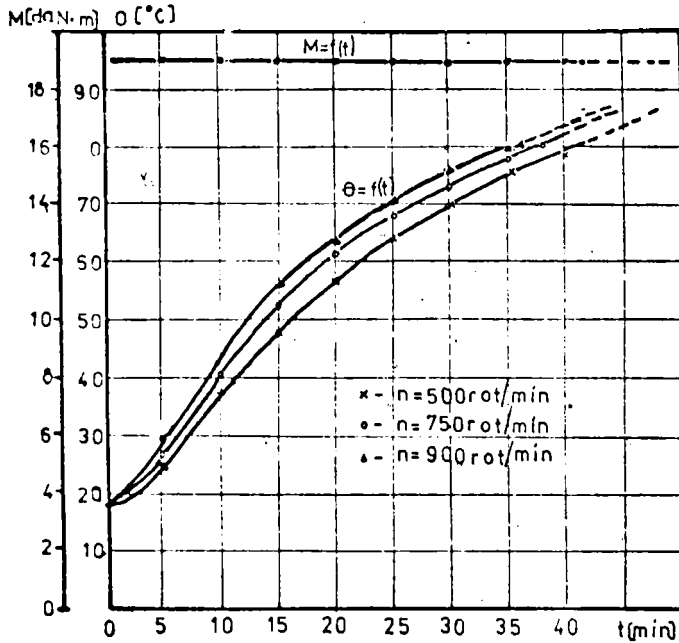


Fig.70. Comportarea termică a frânei de 20 daN.m la  $\delta = 1$  mm.

5.2.1.4. Comportarea dinamică a franei

Pentru determinarea constantei de timp a franei  $T_M$ , adică măsurarea timpului pînă cînd momentul atinge valoarea de stabilizare la un anumit curent de excitație, timp care are valori mici neputînd fi determinat cu precizie cu ochiul liber, am procedat ca și în cazul franei de 0,1 daN.m, cu precizarea că pîrghia pe care s-a montat potențiometrul avea o cursă mai mare, iar valoarea tensiunii măsurate pînă la atingerea cuplului maxim a variat între 2 - 12 V c.c.

Pentru înregistrarea rezultatelor am utilizat un înregistrator tip XY SCHREIBER 622.01 (R.D.G.), cu bară de timp, la o viteză de înregistrare de 1 cm/0,4 s pe axa timpului și de 2V/cm pe axa tensiunii.

După prelucrarea mai multor caracteristici, am reținut pe cea de valoare medie, încercările făcîndu-se pentru  $I_e = 0,5$  A,  $n = 500$  rot/min.,  $k_{UV} = 0,9$ , alimentarea bobinei de excitație făcîndu-se în curent continuu și considerînd că valoarea cuplului maxim atins este de 19 daN.m.

Din studiul caracteristicii dinamice obținută și reprezen-

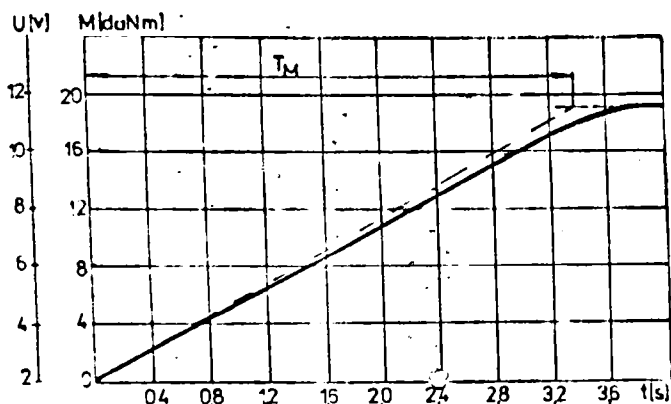


Fig.71. Comportarea dinamică a frinei de 20 daN.m la  $\delta = 1$  mm.

tată în figura 71 ne arată că valoarea constantei de timp a dispozitivului  $T_M = 3400$  ms, mult mai mare decât cea obținută în cazul frinei cu rotor de mică inerție de 0,1 daN.m, pe motivul că, și constanta de timp electrică  $T_e$  în acest caz este mai mare, pre-

cum și din cauza momentelor de inerție mai mari ale maselor în mișcare de rotație.

Comparativ, constanta de timp teoretică de creștere a curentului de excitație ( $L_e/R_e$ ) pentru frina de 20 daN.m, are valoarea de 1620 ms, iar din cauza rotorului masiv, cuplul maxim se obține după un timp mult mai mare decât la frine cu rotor de inerții reduse.

Conform caracteristicii din figura 71 rezultă că, din punct de vedere dinamic, comportarea frinei de 20 daN.m este a unui element proporțional de ordinul unu, funcția sa de transfer fiind cea indicată în §5.1.5., diferind doar  $T_M$ .

#### 5.2.2. Încercări experimentale pentru $\delta = 1,5$ mm

Efectuarea încercărilor pentru această valoare a întrefierului, al cărui volum teoretic de umplere cu pulbere este de 106 cm<sup>3</sup> s-a făcut, ca și în cazul întrefierului  $\delta = 1$  mm, pentru coeficienți de umplere teoretici ai întrefierului  $k_{UV} = 0; 0,5; 0,7; 0,8; 0,9$  și 1,0.

##### 5.2.2.1. Caracteristica statică $M = f(I_e)$ .

Cu precizarea că dispozitivul de protecție termică a fost menținut pe tot parcursul efectuării încercărilor, caracteristica statică s-a ridicat experimental la o viteză de rotație de 500 rot/min., cu pulbere din import tip 410L (Austria), pentru diferite valori ale curentului de excitație  $I_e$ . Această caracteristică poate fi analizată în conformitate cu rezultatele prezentate în tabelul 30 și figura 72.

TABELUL 30: Variația  $M = f(I_e)$  pentru diferite valori  $k_{uv}$ .

$I_e$ /A/	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
$k_{uv}=0$	0	0	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,7
$k_{uv}=0,5$	0	0,4	1,6	4,1	6,8	9,6	10,6	10,8	11,0
$k_{uv}=0,7$	0	0,8	2,6	6,2	10,0	13,8	14,8	15,0	15,2
$k_{uv}=0,8$	0,3	1,0	3,5	7,6	12,0	16,4	17,2	17,4	17,5
$k_{uv}=0,9$	0,7	1,7	5,3	9,6	14,0	18,6	19,0	19,2	19,3
$k_{uv}=1,0$	1,2	2,4	6,2	10,4	14,8	19,0	20,0	20,2	20,2

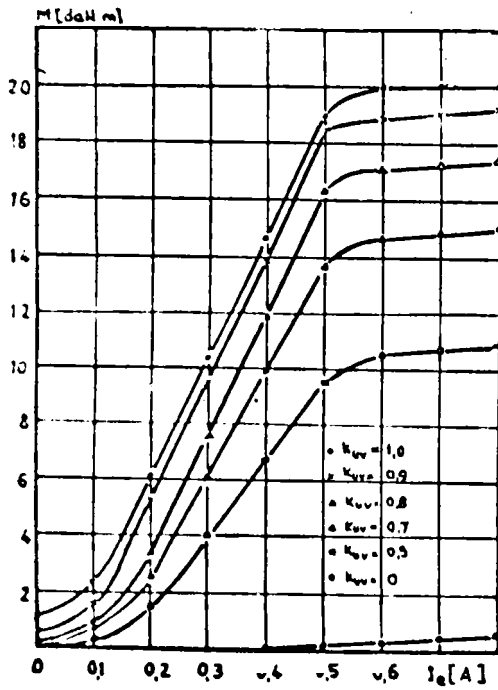


Fig.72. Caracteristica statică la FEP de 20 daN.m dual este mare) la  $\delta = 1,5$  mm.

Valoarea cuplului rezidual la  $k_{uv} = 1$  și  $I_e = 0,5$  A reprezintă 6,3% din cuplul maxim, iar pentru  $k_{uv} = 0,9$  la același curent, reprezintă doar 3,8%, valoare comparabilă cu a dispozitivelor similare executate în străinătate.

Analiza rezultatelor experimentale obținute, -- duce la concluzia că pentru  $k_{uv} = 0,9$ , valoarea cuplului rezidual este redusă, iar valoarea cuplului maxim la  $I_e = 0,5$  A a scăzut într-un raport foarte mic, de la 19 daN.m când  $\delta = 1$  mm, la 18,6 daN.m când  $\delta = 1,5$  mm.

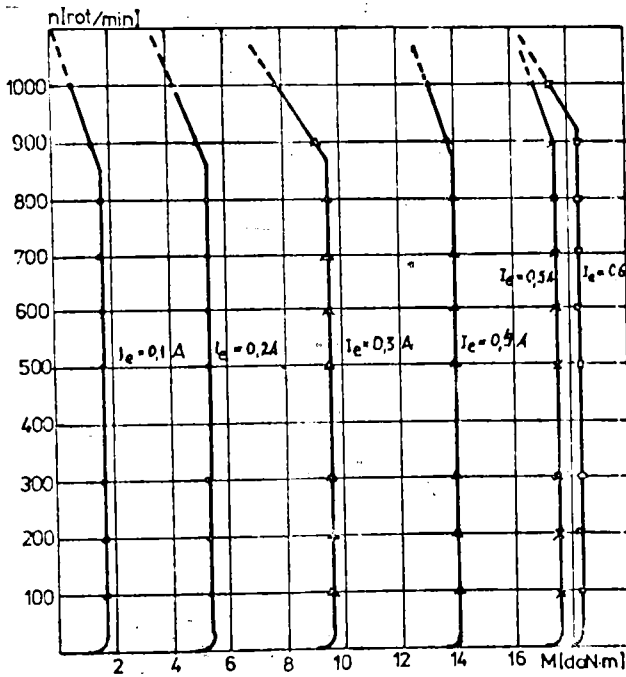
Deoarece, zona de liniaritate a caracteristicii statice este mai mare decât în cazul  $\delta = 1$  mm, considerăm optim  $\delta = 1,5$  mm la  $k_{uv} = 0,9$  (aceasta fiindcă la  $k_{uv} = 1$  încălzirea frinei este mult mai accentuată, din cauza unor flexii de natură mecanică între stratul de pulbere-rotor-stator, iar cuplul rezidual este mare).

5.2.2.2. Caracteristica mecanică  $n = f(M)$ .

Această caracteristică a fost determinată în aceleași condiții ca și în §5.2.1.2., la un coeficient de umplere  $k_{uv} = 0,9$ , modificând treptat viteza de rotație. Rezultatele experimentale obținute sînt prezentate în tabelul 31 și figura 73.

TABELUL 31: Variația  $n = f(M)$  pentru diferite valori ale curentului de excitație  $I_e$ .

n /rot/min./		100	200	300	500	600	700	800	900	1000
M /daN.m/	$I_e = 0,1A$	1,8	1,7	1,7	1,6	1,7	1,8	1,7	1,4	0,8
	$I_e = 0,2A$	5,4	5,3	5,3	5,2	5,3	5,4	5,4	5,0	4,2
	$I_e = 0,3A$	9,4	9,6	9,5	9,4	9,5	9,6	9,6	9,2	7,8
	$I_e = 0,4A$	14,2	14,0	14,0	13,8	13,8	14,0	14,0	13,7	12,2
	$I_e = 0,5A$	18,6	18,6	18,5	18,6	18,6	18,7	18,6	18,5	16,8
	$I_e = 0,6A$	19,4	19,3	19,4	19,5	19,5	19,3	19,4	19,4	18,4



Se poate observa, din figura 73 că în cazul întrefierului  $\delta = 1,5$  mm, se păstrează un paralelism aproape perfect între caracteristicile mecanice pentru diferite valori ale curentului de excitație (circa 4 daN.m pentru un salt de curent de 0,1 A), excepție făcînd caracteristica pentru  $I_e = 0,6$  A, cînd circuitul magnetic și pulbera a jung la saturație.

Făcînd o comparație cu cazul

Fig.73. Caracteristica mecanică la FEP de 20 daN.m și  $\delta = 1,5$  mm.  $\delta = 1$  mm se poate observa că viteza la care cuplul de frinare începe să scadă, are va-



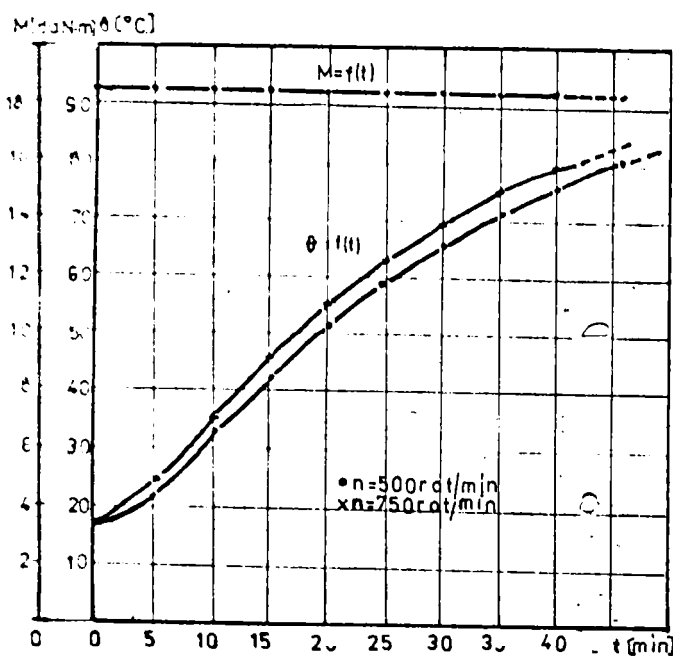
lori puțin mai mici în cazul  $\delta = 1,5$  mm.

### 5.2.2.3. Comportarea termică a frinei

În cadrul acestei încercări am urmărit ca temperatura dispozitivului să nu depășească  $80^{\circ}\text{C}$ , menținând protecția termică reglată la temperatura maximă de  $80^{\circ}\text{C}$ . Condițiile în care s-au determinat rezultatele prezentate în tabelul 32 și figura 74 au fost:  $n = 500$  și  $750$  rot/min.; curent de excitație  $I_e = 0,5$  A; coeficient de umplere  $k_{uv} = 0,9$ .

TABELUL 32: Regimul termic al frinei de 20 daN.m la  $\delta = 1,5$  mm.

t /min./	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
M /daN.m/	18,6	18,6	18,6	18,6	18,5	18,5	18,5	18,5	18,4	18,3
$\theta$ /°C/										
n=500rot/min	17	22	33	42	51	59	65	71	76	79
n =750rot/min	17	25	36	46	55	63	70	75	79	-



Cu toate că, p... a... a... mai scăzută de  $17^{\circ}\text{C}$  în cazul efectuării încercărilor la  $\delta = 1,5$  mm, pentru o mai bună comparație a rezultatelor, am reținut valorile începând cu această temperatură.

Se observă și în acest caz, că la creșterea vitezei de rotație, în aceleași condiții, temperatura dispozitivului are valori puțin mai mari. Variația cu-

Fig.74. Comportarea termică a frinei de 20 daN.m la  $\delta = 1,5$  mm. funcție de temperatură, conform măsurărilor, este nesemnificativă, valoarea acestuia scăzând doar cu 0,3 daN.m după 45 de minute de funcționare.

#### 5.2.2.4. Comportarea dinamică a frinei.

Ridicarea caracteristicii dinamice  $M=f(t)$ , în scopul determinării constantei de timp a frinei la  $\delta = 1,5$  mm, s-a făcut în condiții identice ca și pentru cazul  $\delta = 1$  mm.

Rezultatele medii reținute ale înregistrărilor sînt prezentate în figura 75, de unde se poate observa o foarte mică

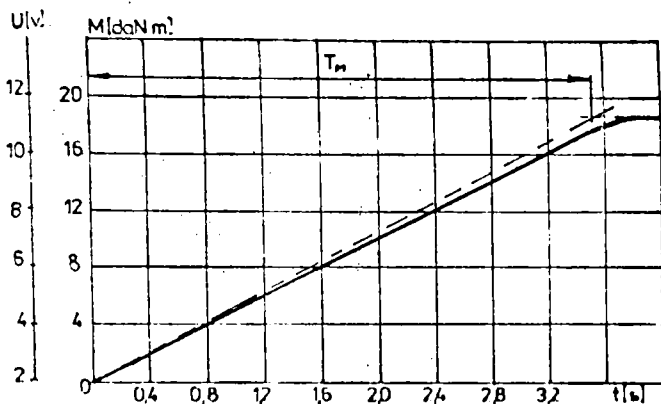


Fig.75. Comportarea dinamică a frinei de 20 daN.m, la  $\delta = 1,5$  mm.

creștere a constantei de timp  $T_m$  în cazul  $\delta = 1,5$  mm față de  $\delta = 1$  mm.

Deoarece, bobina de excitație nu a suferit modificări, rezultă că timpul de răspuns nu depinde de valoarea întrefierului (sau depinde în procente foarte mici), pen-

tru același curent de excitație. Se constată și în acest caz că pentru cazul rotoarelor masive, timpul de creștere al cuplului de frinare la valoarea de stabilizare, este mult mai mare decât timpul de creștere al curentului de excitație la valoarea de saturație magnetică.

#### 5.2.3. Discuții II

Datorită faptului că în cazul experimentărilor pentru frina de 20 daN.m, nu a fost posibilă înlocuirea unor repere cu materiale de altă calitate (ca aluminiu cu coeficient de cedare a căldurii mai mare), din motive de aprovizionare la dimensiunile necesare, vom încerca să analizăm comparativ rezultatele experimentale obținute, la utilizarea materialelor indicate în proiect.

a. Caracteristica statică  $M = f(I_e)$  este aproape liniară pe un domeniu destul de mare, atât pentru  $\delta = 1$  mm cât și pentru  $\delta = 1,5$  mm. Acest aspect se poate observa mai bine din figura 76 unde am reunit cele două caracteristici pentru viteza de rotație de 500 rot/min., la un coeficient de umplere  $k_{uv} = 0,9$  al întrefierului cu pulberă. După cum se vede, diferențele de cuplu la același curent de excitație sînt foarte mici la modificarea în-

trefierului. Ceea ce apare mai pronunțat decît în cazul frînei

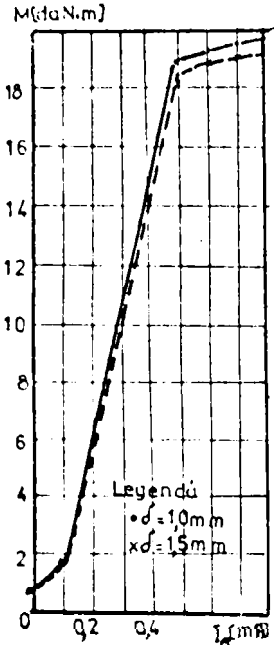


Fig. 76. Caracteristica statică la FEP de 20 daN.m.

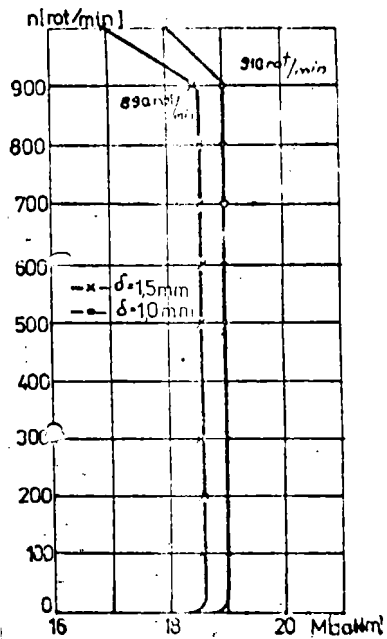


Fig. 77. Caracteristica mecanică la FEP de 20 daN.m.

de 0,1 daN.m este faptul că, la valori mici ale curentului de excitație, cele două caracteristici aproape se confundă. Domeniul de liniaritate al caracteristicii statice se menține pentru valori ale curentului de excitație între 0,12 - 0,48 A, un domeniu destul de larg.

b. Caracteristica mecanică  $n = f(M)$ , în cazul celor două măsurători efectuate pe frîna de 20 daN.m, pentru un curent de excitație constant este o dreaptă, pentru viteze de rotație apropiate de cea nominală. Reunind cele două caracteristici pentru  $I_e = 0,5$  A în figura 77, se poate observa că diferența valorii cuplului pentru cele două întrefieruri este foarte mică (circa 0,4 daN.m). Menționăm că, am procedat la mărirea întrefierului de la 1 la 1,5 mm, deoarece din cauza prelucrărilor și existenței unor excentricități, la  $\delta = 1$  mm existau frecări de natură mecanică între rotor și stator.

După cum se mai poate observa din figură, viteza de scădere a cuplului pentru  $\delta = 1,5$  mm față de  $\delta = 1$  mm, este mai redusă.

c. Comportarea termică a frinei pentru cazul celor două

întrefieruri, poate fi urmărită după figura 78, unde am reunit

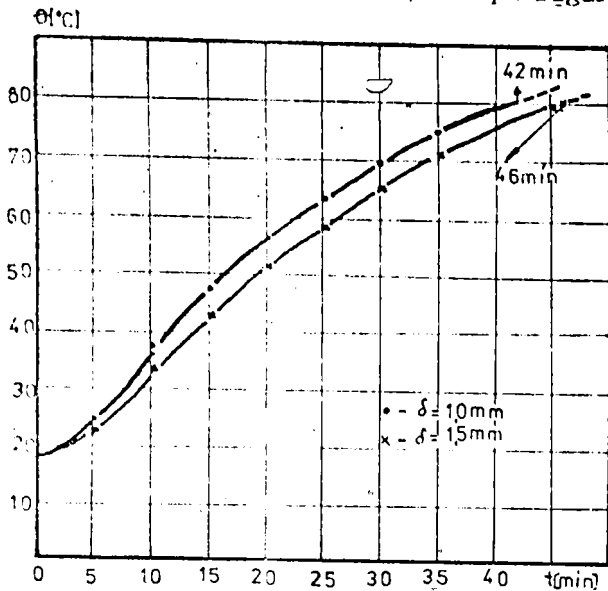


Fig.78. Comportarea termică frînă de 20 daN.m.

curbale de încălzire ale dispozitivului pentru o viteză de rotație de 500 rot/min., la un coeficient de umplere cu pulbere al întrefierului  $k_{uv} = 0,9$ .

Se poate observa din figură, o comportare termică mai bună a frinei la  $\delta = 1,5$  mm, dar diferențele nu sînt semnificative, deoarece creșterea timpului de funcționare pînă la tem-

peratura de  $80^{\circ}\text{C}$  este de numai 4 minute.

Revenim asupra faptului că, la funcționări în regim de alunecare de lungă durată, în mod obligatoriu trebuie să asigurăm condiții de răcire adecvate, pentru a nu distruge bobina de excitație și, presupunem că valorile crescute ale temperaturii în întrefierul dispozitivului vor influența și comportarea stratului de pulbere, prin reducerea permeabilității magnetice a acestuia și uzarea rapidă a pulberii. Neavînd posibilitatea să măsurăm valoarea temperaturii în stratul de pulbere, credem că valoarea acesteia este mult mai mare, din cauza frecărilor mecanice ce au loc.

#### d. Comportarea dinamică a frinei.

Din analiza figurilor 71 și 75, a căror reunire nu ar avea sens, se poate observa că valoarea constantei de timp  $T_M$  crește de la 3400 ms pentru  $\delta = 1$  mm la 3460 ms la  $\delta = 1,5$  mm. Acest lucru este normal, deoarece timpul de fixare al particulelor de pulbere la periferia rotorului și statorului, pentru aceeași valoare a curentului de excitație este mai mare, pentru spații mai mari.

Comportarea dinamică a frinelor cu rotor masiv (de mare inerție) este mai lentă, din cauza unor mase mai mari în mișcare

de rotație. Deoarece, executarea dispozitivelor de frinare cu moment de inerție redus pune probleme deosebite la executarea tehnologică a pieselor și obținerea unui paralelism perfect între rotor și stator pe lungimi mari, în special la momente de frinare ridicate, considerăm că pentru cazul proceselor ce nu necesită un răspuns foarte rapid (sub 3 -5 secunde), executarea frinelor cu rotor masiv este mai avantajoasă, deoarece permite un întrefier mai mare, iar problemele de centrare sînt mai simple.

Cu precizarea că, timpul de creștere al curentului de excitație este mult mai mic decît timpul de răspuns al frinei cu rotor masiv, menționăm că la alimentarea bobinei de excitație în curent alternativ de aceeași valoare efectivă, timpul de răspuns se reduce cu circa 100 ms.

Realizarea scuturilor și a altor repere componente, ce nu participă efectiv la circuitul magnetic, din materiale ușoare ca aluminiu, ar duce atît la reducerea greutății dispozitivelor cît și la realizarea unui schimb termic mai bun, mărind durata lor de funcționare în regim de alunecare.

## C A P I T O L U L 6

### CONSIDERATII SINTETICE PRIVIND ALEGEREA VARIANTEI CONSTRUCTIVE SI MATERIALELE COMPONENTE LA PROIECTAREA FEP

In urma studiului, proiectării, executării și experimentării celor două prototipuri de FEP, se impune necesitatea unor precizări cu privire la alegerea variantei constructive și a materialelor de execuție, precizări ce vor fi prezentate sintetic în continuare.

#### 6.1. Studiul și proiectarea FEP.

Alegerea variantei constructive se va face în funcție de valoarea momentului de frinare și de viteza de rotație. Astfel, la valori mici ale momentului de frinare și viteze de rotație mari, se recomandă proiectarea unor frâne cu rotor de mică inerție (tip pahar), dimensionarea acestora făcându-se în raport de pulberea feromagnetică de care dispunem. La valori mijlocii și mari ale cuplului de frinare, propunem varianta cu rotor masiv, tip roată dințată (figura 25b.), sau cu rotor cilindric masiv (figura 25a.).

În cazul unei pulberi feromagnetice cu caracteristici magnetice bune și forma particulelor apropiată de cea sferică, se impune un studiu amănunțit asupra influenței amestecului separator asupra proprietăților sale magnetice, studiu care nu e posibil decât pe baza unor încercări experimentale.

Asupra calculului dimensiunilor principale ale dispozitivelor, deoarece în acestea intervin foarte mulți coeficienți empirici și experimentali (determinați pentru cazul cuplajelor electromagnetice cu pulbere), e necesar să se asigure anumiți coeficienți de siguranță și în urma experimentărilor să se evalueze valoarea lor exactă. În acest sens, precizez că la proiectarea frinei de 0,1 daN.m, cu un coeficient de siguranță de 1,5 asupra cuplului, valoarea optimă obținută experimental a acestuia a fost de 0,13 daN.m. În cazul frinei de 20 daN.m, unde nu s-a luat în considerare un coeficient de siguranță, valoarea optimă a cuplului obținut este de 18,6 daN.m.

Pentru o bună concordanță între calculele de proiectare și rezultatele experimentale, recomand un coeficient de siguran-

și între 1,1 - 1,4 asupra cuplului de frinare, mai mic pentru cupluri reduse.

Ținând cont de posibilitatea realizării tehnologice a dispozitivelor, valoarea întrefierului se recomandă să fie pe cât posibil mică. Deoarece pentru  $\delta = 0,6$  mm, la frina de 0,1 daN.m și  $\delta = 1$  mm, la frina de 20 daN.m, apăreau frecări de natură mecanică, am adoptat  $\delta = 0,8$  mm, respectiv 1,5 mm. Aceste valori, par totuși destul de mari, deoarece există mașini electrice și cu  $\delta = 0,3$  mm. Precizăm că, reducerea întrefierului duce la mărirea cuplului de frinare și în cazul execuției de serie, se poate rezolva tehnologic realizarea unui întrefier mai mic.

Verificarea rezultatelor proiectării celor două dispozitive s-a făcut pe cale experimentală, pe standuri de probă. Rezultatele astfel obținute se apropie de cele calculate, iar prin utilizarea unor materiale cu proprietăți magnetice mai bune (de exemplu oțelul turnat pentru rotor și stator), performanțele dispozitivelor s-ar îmbunătăți.

Deoarece, în proiectarea acestor dispozitive intervin mulți coeficienți determinați din grafice sau tabele, nu am apelat la proiectarea asistată pe calculator. Totuși, la executarea mai multor dimensiuni în raport cu cuplul de frinare se pot întocmi programe adecvate prin stabilirea unor relații matematice (dezvoltare polinomială) pentru coeficienți. Pentru cazul frinei de 0,1 daN.m în ANEXA I se prezintă o schemă logică de calcul, după care s-a realizat un program de calcul rulat pe calculator.

Dimensiunile principale de gabarit se aleg constructiv, în funcție de tipul de rulmenți, tipul de etangare, iar arborele se va dimensiona în funcție de valoarea momentului transmis, făcându-se în mod obligatoriu verificarea la forfecare.

Deoarece, în lipsa curentului de excitație mărirea momentului este determinată de forțele de frecare ce apar în stratul de pulbere și fluxul magnetic remanent, e necesar ca plasticitatea pulberii să fie cât mai bună, iar fluxul remanent să fie cât mai mic. În cazul alimentării bobinei de excitație, în strat apar forțe magnetice de cuplare care, ca și momentul, cresc proporțional cu curentul pînă la saturația magnetică.

În afara forțelor magnetice, în FEP acționează și forțe mecanice de frecare datorită stratului de pulbere care, de asemenea influențează mărirea momentului.

În sfârșit, o influență substanțială asupra funcționării acestor dispozitive o exercită starea lor termică, ținând cont că lucrează permanent în regim de alunecare.

Calculul termic se poate efectua cu precizie doar pentru cantitatea de căldură degajată de bobina de excitație prin efect Joule. Pentru cantitatea de căldură degajată prin frecarea particulelor materialului de umplere, între acesta și rotor-atator, un calcul precis este aproape imposibil. De aceea, caracteristica termică se impune a fi determinată experimental, deoarece influențarea sensibilă corectă funcționare. La creșterea temperaturii are loc o creștere a rezistenței electrice a bobinei de excitație și se micșorează rezistența la forfecare a particulelor de pulbere, modificând din cauza dilatărilor, parametrii geometrici ai întrefierului.

Temperatura limită admisă în exploatare este impusă de caracteristicile materialelor izolante și a materialului separator, deoarece punctul Curie al pulborilor metalice este situat între  $770 - 870^{\circ}\text{C} / 74\%$ , temperatură ce nu poate fi atinsă.

În acest fel, în FEP au loc procese magnetice, mecanice și termice, a căror analiză calitativă și cantitativă este deosebit de complicată din punct de vedere teoretic, astfel că, pentru o proiectare optimă sînt necesare multe experimentări, pe intervale de timp lungi, asigurîndu-se condiții de răcire adecvate.

## 6.2. Materiale folosite la realizarea FEP.

Calitatea materialelor utilizate determină, în mod implicit particularitățile funcționale ale frinelor, dar la alegerea acestora trebuie să luăm în considerare și aspectul economic. La alegerea materialelor magnetice trebuie să ne orientăm spre acelea care asigură o permeabilitate magnetică mai mare. Influența histerezisului magnetic (fluxul remanent) ca urmare a existenței în circuitul magnetic a întrefierului, rămîne neesențială și poate fi înlăturată prin schimbarea pe timp scurt a polarității curentului de excitație în momentul decuplării.

### 6.2.1. Materiale pentru circuitul magnetic.

Ca și în cazul mașinilor electrice de inducție uzuale, pentru realizarea circuitului magnetic se pot utiliza materiale magnetice moi care prezintă o permeabilitate magnetică ridicată, au forță coercitivă redusă și pierderi mici. Pentru cazul frinelor la care nu se cere un răspuns rapid, circuitul magnetic se poate re-



aliza din oțel electrotehnic cu conținut redus de carbon, denumit și "fierul jug" al cărui conținut de carbon este 0,02 - 0,025%. Pentru cazul în care dorim viteze de răspuns mari, adică timpi reduși, circuitul magnetic se va executa din materiale cu permeabilitate magnetică ridicată, permalloy sau permendur, care au caracteristici magnetice puternice, de avantajul lor constând în costul de producție ridicat.

Circuitul magnetic al frinelor lente de dimensiuni mici și mijlocii pot fi executate din oțel laminat marca OL 52.2k al cărui conținut de carbon este garantat, iar în cazul unor frâne de cuplu mare se va utiliza oțel turnat, aceasta pe motivul evitării cheltuielilor suplimentare pentru unele prelucrări mecanice și a economiei de metal.

La utilizarea frinelor în instalații de importanță redusă, circuitul magnetic poate fi executat și din fontă care deși are proprietăți magnetice mai slabe, este mai ieftină, asigurând ușor forma dorită și, mai mult, calitățile ei pot fi îmbunătățite prin adăugarea unor cantități mici de sulf și prin tratamente termice în scopul reducerii durtății magnetice.

Pentru cazul utilizării frinelor în curent alternativ ar fi indicat să se execute circuitul magnetic din table de oțel electrotehnic cu conținut redus de carbon din oțel aliat, cu grosimi de 0,75 - 1 mm cu conținut mărit de nichel. Ținând cont de realizarea constructivă, precum și de faptul că folosirea unor oțeluri aliate cu costuri de producție ridicate nu este justificată prin creșterea aproape nesemnificativă a inducției, utilizarea acestor materiale nu este eficientă.

Particularitățile magnetice ale materialelor pot fi modificate prin introducerea sau eliminarea unor elemente. Astfel, permeabilitatea magnetică este sensibil mărită prin micșorarea conținutului de carbon; în acest caz scade forța coercitivă a materialului. La un conținut limitat de mangan (până la 0,5%) crește cu ceva inducția de saturație, dar crește și forța coercitivă. Utilizarea oțelurilor aliate cu ajutorul sulfurii, are proprietatea că duce la creșterea rezistenței electrice (aceasta înseamnă reducerea curenților turbionari), creșterea permeabilității magnetice, reducerea forței coercitive și pierderilor prin histerezis.

Particularitățile indicate pentru sulf sînt foarte prețioase în cazul FEP cu caracteristici dinamice ridicate, deoarece

mărirea rezistenței active a circuitelor; deci micșorarea curenților turbionari, duce la un timp de răspuns mic.

Oțelul sulfurat va trebui să fie supus unui tratament termic de recoacere în mediu neoxidabil, la o temperatură de 750 - 800°C cu o durată de 2 - 5 ore, în scopul omogenizării.

Mărirea conținutului de aluminiu la oțelurile aliate oferă aceleași proprietăți ca și pentru sulf, mărind rezistența electrică, dar scade inducția de saturație. Un procent prea mare de aluminiu ar putea duce chiar la demagnetizarea circuitului magnetic.

La utilizarea oțelului electrotehnic trebuie să ținem cont că acesta este foarte sensibil la deformări (gâșnare, tăiere), ceea ce reduce particularitățile magnetice ce pot fi refăcute doar prin efectuarea de tratamente termice.

#### 6.2.2. Materialle pentru elemente nemagnetice.

Deoarece în construcția FEP intervin multe elemente care nu participă efectiv la circuitul magnetic (capace, arbori, rulmenți, elemente de fixare, elemente de etangare, ș.a.), în scopul de a reduce "împrăștierea magnetică", e necesar ca acestea (acolo unde este posibil) să fie confecționate din materiale nemagnetice sau slab magnetice. Pentru aceste elemente se poate folosi oțelul slab magnetic din clasa austenitică, oțelul inoxidabil nemagnetic, crom-nichel, crom-mangan, alama, duraluminiu, fonta nemagnetică.

Oțelul cromat, în comparație cu oțelul pe bază de carbon, oferă o durabilitate ridicată a organelor de mașini care lucrează în condiții de uzură la frecare (arbori, mangoane) și, în comparație cu oțelul crom-nichel are o elasticitate mai mică, dar poate fi supus unor tratamente termice pentru obținerea caracteristicilor dorite.

Oțelul crom-nichel, după tratament termic, asigură particularități mecanice superioare celui cromat în privința rezistenței, elasticității și durabilității.

Oțelul crom-mangan, față de crom-nichel, are o elasticitate ceva mai mică, dar permite obținerea unei durabilități mai mari prin călire putând fi utilizat cu succes pentru organele frinei ce nu participă la realizarea circuitului magnetic.

Alama și duraluminiu se vor utiliza pentru elementele ce nu sînt supuse unor solicitări mecanice apreciabile (capace, radiatoare de răcire, guruburi de umplere și golire).

Rulmenții de sprijin ai rotorului se recomandă să fie exe-

cutați din oțel nemagnetic și prevăzuți cu apărători împotriva pătrunderii pulberii. În cazul vitezelor de rotație reduse se poate studia varianta de înlocuire a rulmenților cu lagăre de alunecare pe buche de material plastic.

Utilizarea materialelor plastice (fenoplast, duramin, ș.a.) care rezistă la temperaturi între 54 - 150°C trebuie luată în considerare la proiectarea dispozitivelor, deoarece asigură rezistență mecanică suficientă, au particularități izolatoare bune, nu se corodează și sînt economice.

Cu mențiunea că, utilizarea duraluminiului în cazul frinei de 0,1 daN.m pentru confecționarea unor repere și a unui radiator de răcire, au mărit durata de funcționare de aproape două ori, acest lucru nu a mai fost posibil pentru frina de 20 daN.m, al cărei gabarit este mult mai mare.

### 6.2.3. Materiale utilizate pentru bobina de excitație.

Din multitudinea factorilor ce determină caracterul procesului electromagnetic din FEP, un rol important îl are alegerea corectă a materialelor pentru bobina de excitație.

Diametrul conductoarelor pentru bobine se va alege în funcție și de dimensiunile acestora și de valoarea cuplului de frinare. Pentru cazul frinelor de gabarit redus (ca și în cazul cuplajelor) se recomandă realizarea bobinei cu un singur conductor, cu diametre între 0,05 - 0,15 mm. Din cauza unui regim termic ridicat, utilizarea conductoarelor cu diametre sub 0,05 mm nu este recomandată.

Pentru frine de gabarite mijlocii și mari, în funcție de valoarea cuplului și implicit a curentului de excitație, conform unor calcule estimative, diametrul conductoarelor de bobinaj variază între 0,1 - 2 mm. Se înțelege că, aceste valori sînt doar orientative, deoarece pentru curenți de excitație de valori ridicate, bobina poate fi realizată și cu mai multe conductoare în paralel, sau dispozitivul se realizează cu mai multe bobine de excitație alimentate în paralel (cazul frinei de 120 daN.m a firmei Vibrometer care dispune de patru bobine).

Din cauza regimului termic ridicat, considerăm că utilizarea conductoarelor din cupru este cea mai avantajoasă în cazul în care nu se asigură un sistem de răcire suplimentar. Utilizarea conductoarelor de aluminiu duce la o creștere a gabaritului și la un regim termic mai intens.

După cum este cunoscut, dimensiunea conductorului de bobinaj, determină ordinea de înfășurare. Astfel, pentru conductoare pînă la 0,1 mm se poate executa o înfășurare liberă, iar pentru conductoare cu diametre mai mari e necesar a executa bobinarea în rînduri. Pentru diametre de conductoare sub 0,2 mm se poate admite o densitate de curent între 6 - 8 A/mm<sup>2</sup>, iar pentru conductoare cu diametre peste 0,5 mm, densitatea de curent se poate alege între 2,5 - 5 A/mm<sup>2</sup> /22, 42/ pentru cazul funcționării dispozitivelor în regim de scurtă durată, fără asigurarea condițiilor de răcire suplimentară. În cazul în care nu se asigură condiții de răcire adecvate, la funcționarea în regim de lungă durată, e necesar ca la proiectarea dispozitivelor să se prevadă o densitate de curent mai mică, deoarece, cum am mai arătat, regimul termic este influențat nu numai de curentul de excitație ci și de cauze privind frecarea mecanică în stratul de pulbere feromagnetich.

În alegerea conductoarelor pentru bobinele de excitație este foarte important să se aleagă clasa de izolație corespunzătoare, recomandabil fiind a se alege clasa de izolație F (care asigură supratemperaturi de 105°C) sau clasa de izolație H (asigură supratemperaturi de 130°C); ținînd cont de costul de producție ridicat al conductoarelor din clasele de izolație F și H, optez pentru clasa de izolație B, care admite o supratemperatură de 30°C, fiind conductoarele cele mai utilizate în practică.

De asemenea, la executarea bobinelor, trebuie să se asigure o rezistență mecanică suficientă în stratul izolant, deoarece pot să apară scurtcircuite între spirele bobinei. Rezistența electrică a bobinei nu constituie o problemă deosebită, deoarece tensiunea de excitație este redusă (sub 150 V), ceea ce nu provoacă tensiuni mari între spire sau între straturi.

Bobinele FEB pot fi executate cu carcasă din material izolant ori aluminiu, sau fără carcasă. Pentru cazul diametrelor de conductoare mici recomand executarea bobinelor cu carcasă (pe motivul că executarea acestora este mai simplă și consolidarea mecanică mai bună), iar în cazul carcasei din aluminiu, în mod obișnuit aceasta se va acoperi cu un strat de izolație (lac, oxid, etc.), pentru înlăturarea pericolului eventualelor scurtcircuite între spirele la care se distruge izolația și circuitul magnetic.

Pentru bobinele cu diametre mari, din experiența proprie, aș recomanda ca acestea să fie executate fără carcasă, deoarece la demontări repetate în cursul experimentărilor, carcășele se

pot distruge, realizarea carcасelor fiind o problemă dificilă atât de aprovizionare cât și de execuție. Din aceste motive, recomand executarea bobinei pe un model gablon, consolidarea acesteia cu rășină epoxidică, izolarea cu bandă de bumbac și fixarea în circuitul magnetic cu electropastă. Evident că, și acest procedeu prezintă dezavantajul recuperării dificile a materialului conductor în cazul unor defecte sau greșeli de proiectare, înlocuirea bobinei făcându-se prin strunjire, dar, se pare a fi metoda cea mai ieftină. În cazul unei producții de serie, când carcasa s-ar putea executa din mase plastice prin injecție, realizarea bobinelor cu carcasă devine avantajoasă.

În scopul evitării distrugerii bobinei de excitație, din cauza regimului termic intens, în mod obligatoriu, aceste dispozitive vor fi prevăzute cu protecție termică, stabilind experimental valoarea temperaturii limită.

#### 6.2.4. Elemente de etangare.

Problemele legate de etangarea dispozitivelor de frinare se referă în mod deosebit la protecția lagărelor împotriva amestecului de umplere din întrefier. Deoarece există și variante la care amestecul de umplere este lichid (foarte puțin utilizate), etangarea acestor dispozitive pune probleme deosebite.

Pentru cazul studiat, material de umplere solid, etangarea lagărelor se poate face cu: inele de piatră, inele din fetru sau grafit, manșoane din cauciuc (semeringuri) sau piele, etangări magnetice (capcane), labirinturi, ș.a.

Pentru asigurarea unei bune etangeități, inelele de piatră trebuie să fie executate din lină groasă sau semigroasă tehnică. Deoarece viteza de rotație la acest tip de etangare este relativ redusă, pentru frinele ce lucrează la viteze mari e necesar să se aibă în vedere acest lucru.

Utilizarea inelelor de etangare din grafit ar fi avantajoasă deoarece prezintă un coeficient de frecare mic, au o rezistență termică ridicată, dar, sînt dificil de realizat tehnologic.

Manșoanele din cauciuc (semeringuri) prezintă o elasticitate bună într-un interval larg de temperaturi, fiind indicat a fi executate din cauciuc special, rezistent la ulei, cu un domeniu al temperaturilor de  $-35 - +150^{\circ}\text{C}$ .

Manșoanele din piele, cu grosimi între 2 - 2,5 mm, sînt mai rar utilizate la etangări în special la viteze de rotație mari,

deoarece nu rezistă la temperaturi prea ridicate.

Dacă etanșarea cu cauciuc sau piele nu este adecvată condițiilor de exploatare impuse, etanșarea se poate executa cu fluoroplast, care poate fi bine prelucrat și presat, este rezistent la medii active chimice, în intervalul de temperaturi  $-125 - +250$  °C./22%.

Folosirea pentru etanșare a inelelor de piatră sau fetru la frinele ce lucrează în regim termic intens este redusă, deoarece aceste materiale, la temperaturi mai mari de  $80 - 100$  °C încep să se distrugă și și pierd rapid proprietățile de etanșare.

Rezultate mai bune în privința etanșărilor /43, 55, 75/ au dat etanșările combinate cu manșon de cauciuc și un magnet permanent, cu manșon de cauciuc și capcane magnetice, cu manșon de cauciuc și labirinturi, ultimele necesitând o prelucrare mecanică foarte atentă.

Capcanele magnetice ce pot fi utilizate sînt etanșări din magneți permanenți (mai rar electromagneți) care rețin particulele de pulbere, iar acestea dispunîndu-se pe intervale, joacă la rîndul lor rolul de etanșare.

Totuși, magneții permanenți din aliaje magnetice dure, consider că nu asigură o etanșare satisfăcătoare, deoarece în timp, își schimbă poziția polilor și drept urmare, în spațiul inelar poate apărea o zonă neutră care nu e capabilă să mențină particulele feromagnetice.

Cu precizarea că, în U.R.S.S. se utilizează cel mai mult și cu rezultate foarte bune la etanșare magneții din ferită de bariu /96/, conjugate cu etanșări de tip labirint, metodele de etanșare nu sînt epuizate, acestea fiind alese în funcție de construcția și destinația dispozitivului, de regimul termic, de particularitățile amestecului de umplere, de felul ungerii, de aspectul economic, ș.a.

În cazul celor două frîne proiectate, rezultate mai bune a dat etanșarea cu manșon de cauciuc și magnet permanent din cazul frînei de 0,1 daN.m, la care, după un timp de funcționare intermitent de circa 50 ore, nu s-a observat pătrundere de pulbere la rulmenți. La frîna de 20 daN.m, aproximativ după același interval de timp, pulberea a pătruns la rulmenți (este adevărat că în cantități reduse), aceasta probabil și din cauza unor demontări și montări repetate. Este recomandat ca rulmenții folosiți să fie de tipul cu carcasă (metalică sau din plastic), pentru o mai bună protecție a acestora.

### 6.2.5. Amestecul de umplere

Caracteristicile de bază ale FEP depind în mod esențial de calitatea pulberii utilizate, așa cum s-a observat și din încercările efectuate cu frâna de 0,1 daN.m în cazul pulberii preparată în laborator.

Pentru obținerea caracteristicilor optime, pulberea feromagnetică utilizată trebuie să satisfacă următoarele condiții:

a. Să asigure valoarea cea mai ridicată a cuplului de frinare; la decuplarea curentului de excitație al bobinei, cuplul remanent să nu existe sau să aibă valori minimale. Pentru satisfacerea acestei cerințe e necesar ca permeabilitatea magnetică a pulberii să fie mare în cazul unui câmp magnetic puternic, iar forța coercitivă să fie minimă.

b. Să asigure stabilitatea caracteristicilor frinei un timp îndelungat. Această condiție este îndeplinită în cazul unei oxidări minime a pulberii la un regim termic intens, care poate depăși uneori 300°C /19/, iar pulberea trebuie să prezinte o rezistență mecanică ridicată pentru regimuri de alunecare îndelungate.

c. Să nu se ardă și să nu formeze bulgări la temperaturi ridicate, iar proprietățile sale magnetice să nu se modifice la oscilațiile de temperatură în limite largi.

d. Să posede o înaltă mobilitate pentru decuplarea totală și rapidă în cazul anulării curentului de excitație.

Deoarece, în mod sigur, nu toate pulberile feromagnetice satisfac total aceste cerințe, alegerea acestora se va face în urma unor experimentări, în funcție de destinația dispozitivului. Pentru cazul frinelor ce lucrează timp îndelungat în regim de alunecare (de exemplu la probele de duranță ale unor utilaje) cerințele cele mai importante sînt cele referitoare la rezistența la temperaturi ridicate și la uzură. Pentru frînele ce lucrează în regim intermitent de scurtă durată, dar necesită timp de răspuns mici, trebuie să se asigure un cuplu remanent minim și rapiditate de acționare.

Amestecul de umplere al întrefierului este constituit din pulbere feromagnetică și elemente care asigură o mobilitate mare a particulelor de pulbere, cunoscute sub numele de separatori.

În literatură /22, 42, 43, 73, 74, 77/ se arată că la realizarea acestor dispozitive, amestecul poate fi uscat sau lichid, fiecare în parte prezentînd avantaje și dezavantaje.

În calitate de pulbere feromagnetică, de obicei se utilizează fierul/carbonul cu particule de formă sferică, cu diametre între

0,004 - 0,008 mm, cu conținut de carbon între 0,7 - 0,8%.

În afară de fierul carbonil se pot utiliza /22, 77/ pulberi din fier recopt sau cele obținute din fier pulverizat (fierul topit este pulverizat cu un jet de aer comprimat). Obținerea pulberilor din fier poate fi realizată și prin alte procese tehnologice cum ar fi: coroziunea intercristalină (metodă costisitoare); fragmentarea mecanică în mori turbionare; amestecarea mecanică a unor componente și aliaje.

Amestecul de umplere lichid ar avea avantajul că asigură o mobilitate mai bună a particulelor feromagnetice în stare magnetizată sau slab magnetizată, ceea ce duce la o caracteristică de lucru foarte rapidă.

Ca mediu lichid se pot utiliza /77/ uleiurile minerale sau uleiurile sintetice. În cazul temperaturilor scăzute (până la 70 °C) se poate utiliza uleiul de transformator, iar pentru temperaturi mai ridicate uleiuri speciale rezistente la temperatură. Din categoria uleiurilor sintetice se pot folosi combinațiile de potasiu organice.

Dezavantajul utilizării amestecului de umplere lichid, îl constituie în primul rând, necesitatea realizării unei etanșări foarte sigure, deoarece scurgerea și evaporarea uleiului usucă amestecul de umplere. Ca urmare, scade mobilitatea particulelor, scade cuplul transmis, se creează spațiu pentru intrarea aerului în întrefier intensificându-se oxidarea pulberii feromagnetice.

De asemenea, mediile lichide au o rezistență mică la căldură, la temperaturi mari se produce oxidarea lor și elimină substanțe rășinoase care vor duce la aglomerarea pulberii sub formă de bulgări și scăderea substanțială a cuplului de frinare.

Utilizarea uleiurilor sintetice, pe lângă faptul că necesită un lichid suplimentar de stabilizare, au dezavantajul că duc la îmbătrânirea pulberii.

În cazul amestecului de umplere uscat, ca separator se poate folosi talcul și grafitul, oxizii de magneziu și zinc, cuarțul, sticla fin dispersată, ș.a.

Dezavantajele amestecului de umplere uscat ar fi:

- duce la o înrăutățire a termoconductibilității părților frinei, deoarece creează straturi de aer;
- mobilitatea particulelor de pulbere este mai scăzută;
- asigură o protecție redusă a porțiunilor circuitului magnetic față de acțiunea oxigenului.



Cu toate acestea, luind în considerare și factorul economic, majoritatea constructorilor de frâne cu pulberi, utilizează amestecul de umplere uscat.

Îmbătrânirea amestecului de umplere, care reprezintă o schimbare ireversibilă a proprietăților mecanice și fizico-chimice ale acestuia în procesul de exploatare, are o influență deosebită asupra caracteristicilor dispozitivelor, fiind necesar a fi înlocuit.

Fenomenul de îmbătrânire, decurge deosebit de activ în cazul temperaturilor ridicate, în condițiile schimbului de gaze din interior cu atmosfera, producându-se depunerea particulelor (acestea nu mai au posibilitatea să se reorienteze în strat datorită condensării lor). Această depunere, probabil este mai frecventă la decuplarea bobinei de excitație, când amestecul de umplere nu mai e magnetizat.

Cu toate că, în cazul amestecului de umplere lichid, este de așteptat să nu se producă aceste depuneri /22/, totuși și în acest caz apare fenomenul de îmbătrânire, datorită faptului că pentru temperaturi ridicate pelicula de ulei se destramă, apar reziduuri cleioase ce duc la cocsificarea particulelor de pulbere, scăzând mult performanțele dispozitivelor.

Alegerea pulberii feromagnetice se va face ținând cont de dimensiunea particulelor și dimensiunile întrefierului, pe motivul că imbinarea acestor mărimi influențează asupra inducției magnetice din strat.

Cu toate că, majoritatea autorilor indică umplerea în exces a întrefierului cu amestec, din încercările experimentale efectuate am observat că, pe lângă faptul că regimul termic al dispozitivelor este foarte solicitant, valoarea cuplului remanent la  $k_{uv} = 1$  este apreciabilă. De aceea, recomandăm ca fixarea gradului de umplere să se facă în urma efectuării de încercări și să se stabilească un coeficient de umplere optim, care să asigure un cuplu apropiat de cel nominal și un cuplu remanent cât mai mic.

În mod normal, pentru întrefieruri mici, umplerea uniformă este asigurată de pulbere fină cu formă sferică, iar la întrefieruri, aceasta poate fi mai grosolană, cu particule de formă neregulată (dendritică).

Deoarece am observat, în cazul utilizării pulberii sub formă de așchii (cea preparată în laborator), la observare sub microscop, o netezire a muchiiilor ascuțite, recomandăm ca aceste tipuri de pulbere să nu se folosească.

Motivarea acestei recomandări se datorește faptului că abrazivul foarte mic al aghiilor desprinse s-a depus pe suprafețele de lucru ale frinei după un timp de funcționare redus (circa 10 ore), cuplul de frinare a scăzut, fiind necesară desprinderea pulberii cu gmirghet fin. De aceea, pe cât e posibil se va utiliza pulbere de formă sferică sau ovală, care nu prezintă muchii ascuțite.

Deoarece, după umplerea întrefierului amestecul e mai mult sau mai puțin omogen, sub influența forțelor electrice, magnetice și mecanice, acesta își schimbă macrostructura. Datorită cimpului magnetic, perpendicular pe suprafața de lucru, se formează legături la baza cărora stau particulele de pulbere feromagnetice.

Ca urmare a deplasării uneia din suprafețe, se produce o curbare a legăturilor, formând un anumit unghi. La valoarea critică determinată a acestui unghi, legăturile se vor distruge și cuplul scade brusc. Această observație este una din explicațiile ce pot fi date la scăderea cuplului peste o anumită viteză de rotație.

Valoarea critică a acestui unghi este de  $15 - 30^\circ$ , în funcție de compoziția amestecului și lățimea întrefierului.

După ruperea legăturilor, particulele intră într-o mișcare dezordonată, fiind supuse acțiunii forțelor mecanice și magnetice, nemaiputând stabili legătura între rotor și stator.

La cuplarea bobinei, în amestec apar eforturi de deplasare a căror mărime depinde de valoarea inducției. Deoarece, efortul de deplasare  $\chi$  determină mărimea cuplului de frinare, iar inducția  $B$  pînă la saturație depinde liniar de curentul de excitație, rezultă că particularitatea de bază a FEP este independența cuplului de frinare de viteza de rotație (pînă la desprindere) și dependența acestuia aproape liniară de curentul de excitație.

Deoarece, în cazul experimentărilor nu am avut posibilitatea modificării lungimii întrefierului, nu am putut verifica o corelare între această lungime și valoarea histeresisului mecanic.

Dar, ca și în cazul maginilor electrice obișnuite, presupunem că la mărirea lungimii întrefierului în comparație cu lățimea lui, se cere un timp mai lung pentru atingerea stării de echilibru, adică histeresisul mecanic e mai mare și invers. În cazul în care se reduce prea mult lungimea întrefierului, este ușorată aruncarea amestecului de umplere în strat, ceea ce va provoca o instabilitate a funcționării. Pentru fiecare tip de pulbere va trebui să se experimenteze, să se afle corelația cea mai bună între lungimea și lățimea întrefierului, pentru o bună stabilitate în funcționare.

## C O N C L U Z I I

Pe parcursul elaborării prezentei lucrări și în urma cercetărilor experimentale efectuate s-au desprins o serie de concluzii cu privire la proiectarea optimă a FEP și exploatarea acestora în funcționare, concluzii ce vor sta la baza proiectării și executării unor FEP cu cupluri de frinare mai mari, în cercetările viitoare.

a). Alegerea soluției constructive și dimensionarea FEP reprezintă o problemă complexă, având în vedere numărul mare de elemente care trebuie luate în considerare și o preocupare redusă a specialiștilor în acest domeniu, cum ar fi:

- realizarea tehnologică a întrefierului la dimensiuni cât mai mici;
- valoarea maximă a cuplului de frinare transmis;
- valoarea maximă a vitezei de rotație, de care trebuie să ținem seama la alegerea formei și dimensiunilor rotorului;
- timpul de răspuns al dispozitivului;
- compoziția pulberii feromagnetice și proprietățile sale de magnetizare, precum și comportarea acesteia în timp;
- regimul termic al frinei, care, în comparație cu cel al unui cuplaj este foarte accentuat, din cauza funcționării în regim permanent de alunecare; și nu poate fi determinat teoretic decât cu mari aproximații;
- calitatea materialelor ce formează circuitul magnetic;
- posibilitatea utilizării unor materiale (care nu participă la circuitul magnetic propriu-zis) cu coeficient de cedare al căldurii ridicat și greutatea reduse;
- obținerea cuplului de frinare la puteri de comandă reduse în raport cu puterea comandată;
- regimul de funcționare al frinei (în regim de lungă durată sau în regim intermitent).

b). În teză am încercat să lămuresc, printr-un studiu combinat, teoretic și practic, principalele aspecte ce caracterizează FEP și care intervin în proiectarea acestor dispozitive. Astfel, după un capitol introductiv, prin care am urmărit prezentarea problematicii luată în cercetare, în capitolul 1 am încercat

să fac o prezentare a particularităților constructive ale unor FEP executate pe plan mondial, precum și câteva din aplicațiile lor posibile. Capitolul 2 este consacrat unui studiu teoretic asupra principalelor mărimi electrice și magnetice, determinând modul de repartiție al densității de curent  $J$ , intensității cîmpului electric  $E$ , intensității cîmpului magnetic  $H$  și inducției magnetice  $B$ , în raport de timp și spațiu. În capitolul 3, bazîndu-mă pe unele date referitoare la proiectarea cuplajelor electropmagnetice cu pulbere, indicate în lucrările de specialitate, am încercat să prezint metodică de calcul în proiectarea FEP, metodică ce a stat la baza proiectării a două prototipuri experimentale, unul de 0,1 daN.m la 1500 rot/min. (cu rotor de mică inerție), celălalt de 20 daN.m (cu rotor masiv), din capitolul 4. Capitolul 5 constituie capitolul de încercări experimentale efectuate pe cele două prototipuri proiectate și executate, în vederea stabilirii unei soluții optime. Încercările au fost efectuate pe standuri de probe special amenajate cu trei tipuri de pulbere feromagnetică: pulbere indigenă (preparată în laborator) din oțel obignuit, pulbere tip PS (U.R.S.S.) și pulbere tip 41OL (Austria). Pe baza rezultatelor experimentale obținute și a unor indicații din literatură, în capitolul 6 se fac o serie de precizări cu privire la alegerea variantei constructive și la proiectarea FEP, precum și la modul de alegere al unor materiale ce intră în componența diverselor elemente ale FEP (circuitul magnetic, materiale nemagnetice, bobina de excitație, elemente de etangare, amestecul de umplere al întrefierului).

c). Întrucît datele bibliografice oferă relativ puține elemente teoretice practice (pentru: proiectare; alegerea unor materiale și a formei constructive; plasarea întrefierurilor; vitezele limită ale cuplului de frinare; alegerea unor coeficienți de siguranță ș.a.), considerațiile teoretice din capitolul 4, referitoare la dimensionarea celor două prototipuri experimentale, le-am definitivat după confruntarea cu rezultatele experimentale obținute, care mi-au dat posibilitatea lămuririi, sub aspect fenomenologic, a unor probleme. Astfel, în cazul frinei de 0,1 daN.m, prin adoptarea unui coeficient de siguranță prea mare (inițial a avut valoarea 4) asupra cuplului, rezultatele experimentale erau în discordanță vizibilă cu tema de proiectare. Am refăcut toate calculele de proiectare la un coeficient de siguranță de 1,5, am reexecutat dispozitivul și, rezultatele obținute experimental au fost apropi-

ate de cele calculate. In cazul frinei de 20 daN.m, nerespectându-se la execuție calitatea materialelor circuitului magnetic, în faza inițială, valoarea optimă a cuplului de frinare obținută a fost aproape jumătate din cea luată în calcule. Procedându-se la executarea elementelor din materialul prescris, fără a lua în calcule un coeficient de siguranță, valoarea optimă a cuplului obținut experimental a fost de 93% din valoarea de proiectare.

In cazul pulberii preparată în laborator, deoarece proprietățile sale magnetice sînt reduse, iar forma particulelor este neregulată, conform așteptărilor, valoarea cuplului de frinare este mult mai mică decît în cazul utilizării pulberilor din import.

d). Contribuțiile originale pe care consider că le conține teza constau în:

- determinarea analitică a repartiției principalelor mărimi electrice și magnetice, plecînd de la formulele locale ale legilor generale referitoare la câmpul electromagnetic variabil, pentru medii imobile și, fără discontinuități;

- stabilirea unei metode de calcul a FEP, pe baza unor date prezentate de literatură și a unor parametri determinați experimental de diverși autori pentru cazul cuplajelor electromagnetice cu pulbere și, sistematizarea acestei metode;

- proiectarea, pe baza metodicii stabilite, a două prototipuri experimentale de 0,1 daN.m și 20 daN.m cu forme constructive diferite;

- prepararea unei cantități de pulbere feromagnetică în laborator, fără a utiliza instalații speciale, în scopul de a arăta că de calitate pulberii, depînd în mare măsură performanțele realizate de FEP;

- verificarea experimentală, pe standuri special amenajate, în laborator și în uzină, a celor două prototipuri, un timp îndelungat, experimentări care mi-au permis interpretarea unor fenomene la determinarea condițiilor de funcționare ale FEP, precum și alegerea variantei optime în cazul celor două prototipuri.

e). Rezultatele încercărilor experimentale, executate pe cele două prototipuri, prin care am verificat comportarea lor la modificarea curentului de excitație, modificarea vitezei de rotație, comportarea termică, comportarea dinamică, la diferite valori ale: coeficientului de umplere volumetrică cu pulbere a volumului întrefierului  $k_{UV}$ ; întrefierului  $\delta$ ; tipului de pulbere utilizată și la modificarea calității unor materiale de execuție, au confir-

mat în mod satisfăcător concluziile teoretice.

f). Cercetările viitoare se vor orienta în următoarele direcții:

- realizarea de pulbere feromagnetică pe plan intern, cu calități comparabile cu cele din import, în privința granulației, separatorului, formei și proprietăților magnetice. Menționez că, în cadrul catedrei de "Tehnologia pulberilor" din I.P. Cluj-Napoca, din discuțiile purtate cu tov. Prof.dr.ing. Matei Gheorghe - șeful catedrei, în cadrul stației pilot se poate executa orice tip de pulbere metalică, dar numai pentru cercetări experimentale, nu în cantități industriale. Cunoscând proprietățile pulberii feromagnetice, după experimentări de laborator și pe standuri de probe, se poate alege varianta optimă a dispozitivului de frinare.

- proiectarea, executarea și experimentarea unui dispozitiv de frinare cu cuplu de 120 daN.m, răcit prin circulația forțată a apei la care debitul se reglează automat și asigură o temperatură de maxim 50°C la nivelul bobinei de excitație, în cadrul unei colaborări cu I.M.M.U.M. Baia Mare;

- după realizarea pulberii feromagnetice, cunoscând proprietățile acesteia, pentru programarea pe calculator se va încerca dezvoltarea sub formă polinomială (funcții matematice) a curbelor ce dau anumiți coeficienți luați în calcul și care au fost determinați experimental;

- metodica de proiectare prezentată, fiind valabilă și pentru cazul cuplajelor electromagnetice cu pulbere (în cazul lucrării /50/ s-a proiectat și un astfel de dispozitiv care a dat rezultate foarte bune, deoarece nu apar probleme de răcire suplimentară), se impune continuarea cercetărilor în scopul realizării de dispozitive cu performanțe ridicate, timp de răspuns redus, consum de energie mic și care să asigure un cuplu constant indiferent de viteza de rotație, necesare în mod deosebit în industria roboților industriali.

BIBLIOGRAFIE

1. Angot, A.,       Complemente de matematici, Editura tehnică, București, 1965.
2. Anosov, I.I.,   Cuplaje electromagnetice, Editura energetică de stat, București, 1954.
3. Antoniu, I.S.,   Calculul circuitelor electrice în regimuri normale și anormale de funcționare, Probleme, Editura tehnică, București, 1975.
4. Aramă, L.,       Culegere de probleme de calcul diferențial și integral, Editura tehnică, București, 1964.
5. Attman, A.B.,    Islodevania stabilnosti metalocheramiceskikh postoiianih magnitov, Trud. 9 VNIEM, V 8, 1961.
6. Bogoevici, N.,   Bazele electrotehnicii, Partea I, Elemente de teoria cîmpului electromagnetic, Vol. 1 - 2, Litografia Institutului politehnic "Traian Vuia", Timișoara, 1978.
7. Boianțiu, D.,    Cuplaje, Editura tehnică, București, 1962. (colectiv)
8. Burenkov, N.A.,   Elektromagnitnii tormoz, Brevet U.R.S.S. (colectiv) Nr. 675547/77 și 2512802/79.
9. Călin, S.,       Regulatoare automate, Editura didactică și pedagogică, București, 1976.
10. Cedighian, S.,   Materiale magnetice, Indreptar, Editura tehnică, București, 1974.
11. Corduneanu, A.,   Ecuatii diferențiale cu aplicații în electrotehnică, Editura Facla, Timișoara, 1981.
12. Davies, N.I.,    Eddy-Current Couplings and Brake, Transactions of the A.I.E.E., Power Apparatus and Systems, p.401, August, 1963.
13. Dekker, I.A.,    Engineering Materials, Prentice-Hall Inc, New York, 1959.

14. Dordea, T., Mașini electrice, Editura didactică și pedagogică, București, 1977.
15. Drăghici, I., (colectiv) Calculul și construcția cuplajelor, Editura tehnică, București, 1978.
16. Gheorghiu, I.S., Fransua, A., Tratat de mașini electrice, Editura Academiei R.S.R., București, Vol.I-1968, Vol.III-1971, Vol.IV-1972.
17. Glazenko, T.A., Primenenie elektromagnitnih porogkovih muft dlia ciastogoispolitelinogo mehanizme, Elektricitstvo, Nr. 4, 1958.
18. Goodman, I., Electromagnetic clutches and brakes, Machine Shop Magazine, VII, 1962.
19. Grațianov, Iu.A., (colectiv) Izgotovlenie i harakteristiki porogkovih muft i tormozov, Elektrotehnika, Nr. 11, 1965.
20. Grebe, O., Die Magnetpulverkupplung, Elektrotechnische Zeitschrift, Nr. 9, 1952.
21. Guseinov, F.G., Ciastotni metod opredelenia parametrov elektromagnitnih tormozov i muft skoljenia s magnitnim magnitoprovodom, Elektricitstvo, Nr. 1, p. 44-49, 1971.
22. Habenskii, M., Ia., Elektromagnitnie porogkovie mufti, Izdatelstvo "Mashinostroenie", Moskva, 1968.
23. Hadamard, J., La theorie des equations aux derivees partielles, Editions Scientifiques, Paris, 1964.
24. Hairulin, I.M., (colectiv) Elektromagnitni inducționi tormoz, Brevet U.R.S.S. Nr. 686127/77 și 2468353/79.
25. Halanay, A., Ecuații diferențiale, Editura didactică și pedagogică, București, 1972.
26. Hansen, E. I., Timmler, D.G., Theory of the Eddy-Current Coppling, Transactions of the A.I.E.E., Power Apparatus and Systems, p. 436, August, 1963.
27. Hângănuț, M., Automatică, Editura didactică și pedagogică, București, 1971.
28. Hille, Fr., Reibschlüssige Electromagnet-Kupplungen und Bremsen, Antriebstechnik, Nr. 7, p.256, 1969.
29. Hockner, G., Staubschutz von Lagern, Grundlagen der Landtechnik, Nr. 3, 1952.
30. Hrusa, Ia., Soukup, K., Elektromagnetiká proskova spojka, Elektrotechnický obzor, Nr. 9, 1963.
31. Ifrim, A., Notinger, P., Materiale electrotehnice, Editura didactică



- și pedagogică, București, 1979.
32. Ionescu, D.V., Ecuații diferențiale și integrale, Editura didactică și pedagogică, București, 1972.
  33. Konovalenko, O.V., Bistrotdeistvuışcii privod maloi moșcinosti na elektromagnitnih porogkovih muftah, v kn Elektriceskie mașini maloi moșcinosi (do 600 W), Tinti eļektropromișlennosti, 1962.
  34. Konovalov, G.F., și Sistemī avtomaticescovo upravleniā s elektro-Konovalenko, O.V., magnitnimi porogkovami muftami, Mașinostroe-nie, Moskva, 1976.
  35. Kopelovici, P.A., Sisteme de reglare automată, Editura tehnică București, 1963.
  36. Lepșin, A.M., și Morozov, V.V., Optimizația rasceta i proeiectirovaniia uni-poliarnoi elektromagnitnoi mufti-tormoza, Tr. Moskva avtorod. gor. in-to, Nr. 146, p. 41, 1978.
  37. Le Velle, I.A., New magnetic particle brakes, The Petroleum Engineering, Nr. 1, 1957.
  38. Lister, C.A., Electromagnetic Brake With Controllable Torque, Transactions of the A.I.E.E., Applications and Indutry, p.139, August, Nr. 59, 1961.
  39. Malti, E.S., și Ratakumar, D.I., Theory of the Eddy-Current Coupling, Transac-tions of the A.I.E.E., Power Apparatus and Systems, p. 793, Octombrie, 1963.
  40. Lantea, St., (colectiv) Metalurgie fizică, Editura tehnică, Bucureș-ti, 1970.
  41. Micu, E., Mașini și acționări electrice, Litografia I.I.S. Baia Mare, 1978.
  42. Moghilevski, G.V., Cuplaje și frine electromagnetice cu pulber-e, Editura tehnică, București, 1966.
  43. Moghilevski, G.V., (colectiv) Elektromagnitnie porogkovie tormoza dlia bu-rovih lebedok, Elektricesstvo, Nr. 10, 1963.
  44. Neiman, L.R., și Kalantarov, P.L., Bazele teoretice ale electrotehnicii, Vol.3, Editura tehnică București, 1956.
  45. Novac, I., (colectiv) Mașini și acționări electrice, Editura didac-tică și pedagogică, București, 1982.
  46. Oprea, C., Stadiul actual al realizărilor pe plan mondi-al in domeniul frinelor electromagnetice cu pulberi, Referat de doctorat, Institutul Po-litehnic "Traian Vuia", Timișoara, 1980.

47. Oprea, C., Particularități constructive în realizarea rotorului și statorului la frinele electromagnetice cu pulbere, Referat de doctorat, Institutul Politehnic "Traian Vuia", Timișoara, 1982.
48. Oprea, C., Posibilități de utilizare ale frinelor electromagnetice cu pulbere în industrie, Buletinul științific al I.S. Baia Mare, 1988, (sub tipar).
49. Oprea, C., Contribuții la studiul frinelor electromagnetice, Buletinul științific al I.S. Baia Mare, 1983 (sub tipar).
50. Oprea, C., Elaborare studiu și proiectarea cuplajelor și frinelor electromagnetice cu pulbere, Contract de cercetare Nr. 156 cu I.M.N.U.M. Baia Mare, 1986/1987.
51. Oprea, C., ș.a., Automatizări industriale, Indrumător de laborator, Litografia I.I.S. Baia Mare, 1981.
52. Oprea, C., Contribuții la determinarea analitică a comportării dinamice la transmisia unui autovehicul cu cuplaj electromagnetic cu pulbere, Leziunea de comunicare "TEHNIC 2000", Electrotimis, Timișoara, 1987.
53. Pampel, W., Untersuchungen an Magnetpulverkupplungen, Maschinenbautechnik, Nr. 1 și 3, 1954.
54. Pampel, W., Die Weiterentwicklung der Magnetpulverkupplung in der Deutschen Demokratischen Republik, Maschinenbautechnik, Nr. 7 și 8, 1958.
55. Patrino, I.A., Dmitrieva, S.I., Izgotovlenie magnitnioniagkih izdelii metodom proskovoi metalurghii, Tsentralnii Institut Tehniko-Ekonomiceskoi Informații, Moskva, 1961.
56. Penescu, G., (colectiv) Identificarea experimentală a proceselor automatizate, Editura tehnică, București, 1971.
57. Pietrăreanu, E., Agenda electricianului, Editura tehnică, București, 1971.
58. Petuhin, G.M., Karakteristiki i rasciot elektromagnitnih muft ferromagnitnim napolnitelnem, Električestvo, Nr. 3, 1955.
59. Popescu, Ch., (colectiv) Materiale electrotehnice, proprietăți și utilizări, Editura tehnică, București, 1976.
60. Pozdnev, A.D., Rozman, Ia.D., Cuplaje și frine electromagnetice, Editura

- Nihonbashi, Tokio.
94.     \*\*\*     Catalog 1986, "Vibro-Meter Ges.m.b.H., Khun-  
gasse 17, A-1030, Wien, Austria.
95.     \*\*\*     Catalog 1983, "Warner Electric Brake-Cluch Co",  
Belloit, 53511, Wisconsin, S.U.A.
96.     \*\*\*     Prospect, "Vnegtorghizdat", Uplotnenie elek-  
trömagnitnih poroškoviñ muft, Moskva, 1964.

C U P R I N S

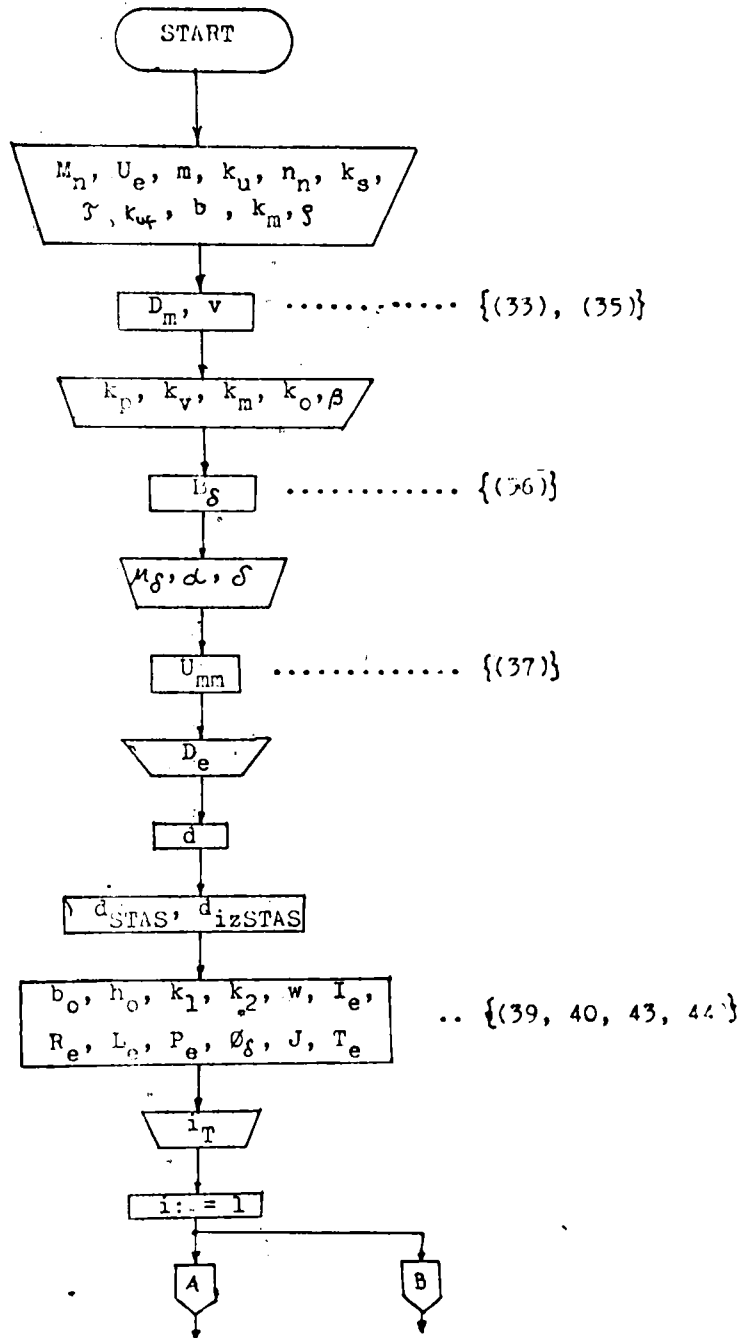
INTRODUCERE . . . . .	1
CAPITOLUL 1. REALIZARI SI PARTICULARITATI CONSTRUCTIVE ALE FEP PE PLAN MONDIAL . . . . .	11
1.1. FEP de uz general . . . . .	11
1.2. FEP pentru instalatii de foraj . . . . .	26
1.3. Concluzii . . . . .	32
CAPITOLUL 2. CONTRIBUTII LA DETERMINAREA ANALITICA A MARI- MILOR ELECTPICE SI MAGNETICE . . . . .	35
2.1. Notații utilizate . . . . .	35
2.2. Generalități . . . . .	35
2.3. Repartiția densității de curent J . . . . .	37
2.4. Repartiția intensității câmpului electric E . . . . .	40
2.5. Repartiția intensității câmpului magnetic H . . . . .	40
2.6. Repartiția inducției magnetice B . . . . .	43
2.7. Calculul pierderilor statorice W . . . . .	44
CAPITOLUL 3. CONTRIBUTII TEORETICE LA PROIECTAREA FEP . . . . .	45
3.1. Considerații generale . . . . .	45
3.2. Determinarea prin calcul a principalilor parametri ai FEP . . . . .	49
3.3. Proiectarea optimă a FEP . . . . .	57
CAPITOLUL 4. DIMENSIONAREA A DOUA MODELE EXPERIMENTALE. . . . .	60
4.1. Proiectarea unei FEP cu $M_n = 0,1 \text{ daN.m}$ . . . . .	60
4.1.1. Calculul principalilor parametri . . . . .	61
4.1.2. Calculul circuitului magnetic . . . . .	62
4.2. Proiectarea unui FEP experimental cu $M_n = 20 \text{ daN.m}$ . . . . .	64
4.2.1. Calculul principalilor parametri . . . . .	71
4.2.2. Calculul tensiunii magnetomotoare $U_{mn}$ . . . . .	72
4.2.3. Calculul bobinei de excitație și al parame- trilor electric . . . . .	72

CAPITOLUL 5. CERCETARI EXPERIMENTALE PE FEP EXECUTATE. . . . .	75
5.1. Incercări experimentale pentru FEP de 0,1 daN.m. . . . .	79
5.1.1. Incercări experimentale pentru $\delta = 0,6$ mm . . . . .	81
5.1.1.1. Caracteristica statică $M = f(I_e)$ . . . . .	81
5.1.1.2. Caracteristica mecanică $n = f(M)$ . . . . .	84
5.1.1.3. Comportarea termică a frinei . . . . .	87
5.1.2. Incercări experimentale pentru $\delta = 0,8$ mm . . . . .	89
5.1.2.1. Caracteristica statică $M = f(I_e)$ . . . . .	89
5.1.2.2. Caracteristica mecanică $n = f(M)$ . . . . .	91
5.1.2.3. Comportarea termică a frinei . . . . .	93
5.1.3. Incercări experimentale pentru $\delta = 1$ mm . . . . .	94
5.1.3.1. Caracteristica statică $M = f(I_e)$ . . . . .	94
5.1.3.2. Caracteristica mecanică $n = f(M)$ . . . . .	96
5.1.3.3. Comportarea termică a frinei . . . . .	97
5.1.4. Dependența principalilor parametri ai frinei de materialele de execuție . . . . .	98
5.1.4.1. Caracteristica mecanică $n = f(M)$ . . . . .	98
5.1.4.2. Comportarea termică a frinei . . . . .	99
5.1.5. Discuții I . . . . .	100
5.2. Incercări experimentale pe FEP de 20 daN.m . . . . .	106
5.2.1. Incercări experimentale pentru $\delta = 1$ mm . . . . .	109
5.2.1.1. Caracteristica statică $M = f(I_e)$ . . . . .	109
5.2.1.2. Caracteristica mecanică $n = f(M)$ . . . . .	111
5.2.1.3. Comportarea termică a frinei . . . . .	112
5.2.1.4. Comportarea dinamică a frinei. . . . .	114
5.2.2. Incercări experimentale pentru $\delta = 1,5$ mm . . . . .	115
5.2.2.1. Caracteristica statică $M = f(I_e)$ . . . . .	115
5.2.2.2. Caracteristica mecanică $n = f(M)$ . . . . .	117
5.2.2.3. Comportarea termică a frinei . . . . .	118
5.2.2.4. Comportarea dinamică a frinei. . . . .	119
5.2.3. Discuții II . . . . .	119
CAPITOLUL 6. CONSIDERATII SINTEICE PRIVIND ALEGEREA VARI- ANTEI CONSTRUCTIVE SI MATERIALELE COMPONENTE LA PROIECTAREA FEP . . . . .	123
6.1. Studiul și proiectarea FEP . . . . .	123
6.2. Materiale folosite la realizarea FEP . . . . .	125
6.2.1. Materiale pentru circuitul magnetic . . . . .	125
6.2.2. Materiale pentru elemente nemagnetice . . . . .	127

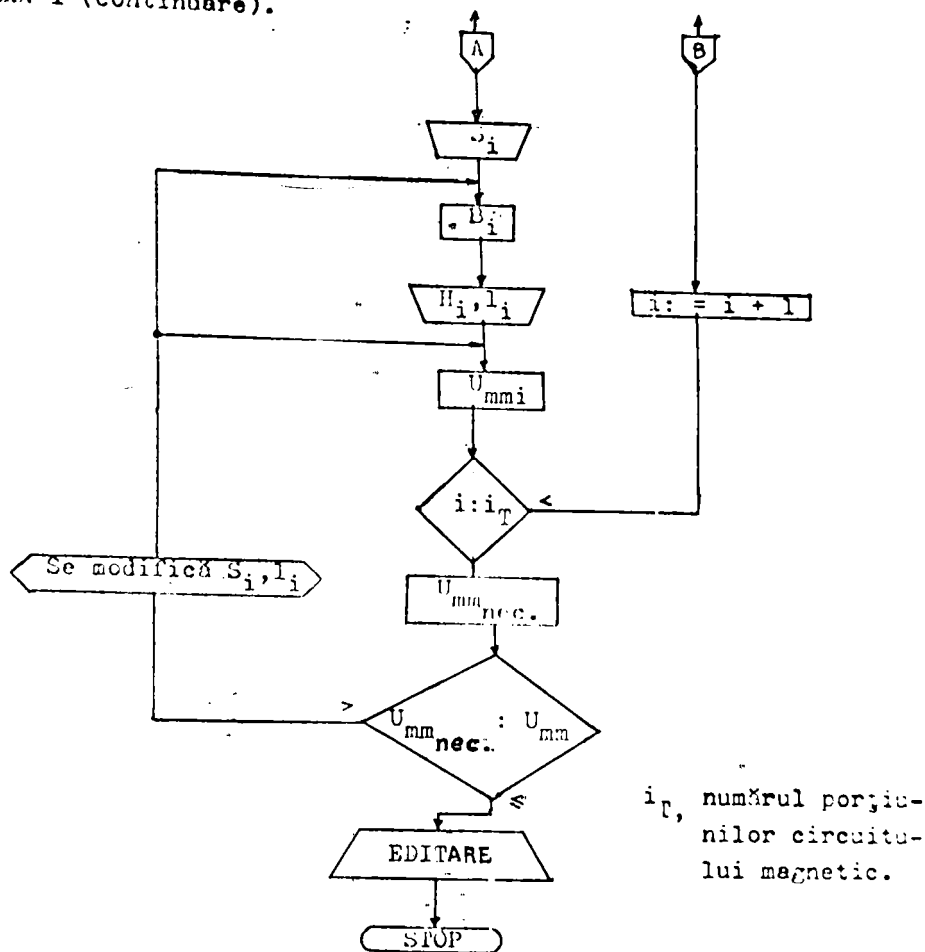
6.2.3. Materiale utilizate pentru bobina de excitație . . . . .	.128
6.2.4. Elemente de etangare. . . . .	.130
6.2.5. Arrestecul de umplere. . . . .	.130
CONCLUZII . . . . .	
BIBLIOGRAFIE . . . . .	.140
ANEXA I Schema logică de calcul pentru IEP de 0,1 daN.m..	





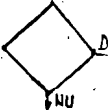




ANEXA I: SCHEMA LOGICA DE CALCUL PENTRU FEP DE 0,1 daN.m.



ANEXA I (continuare).



- Legendă:**
-  Bloc de delimitare (START sau STOP, Inceput sau Sffrșit)
  -  CITEȘTE  SCRIE Blocuri de intrare, respectiv, ieșire.
  -  Bloc de calcul (atribuire) sau inițializare.
  -  Bloc de decizie logică.
  -  Bloc de procedură (subrutină).
  -  Conector. .... {(Comentariu)}.