

UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" TIMIȘOARA
FACULTATEA DE ELECTROTEHNICĂ
CATEDRA DE ELECTROTEHNICĂ

**Traductoare inductive cu lichid magnetic și
aplicațiile lor în tehnică**

• *Teză de doctorat* •

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

Conducător științific:
Prof. dr. ing. Ioan De Sabata

Doctorand:
Ing. Nicolae - Călin Popa

1997

Cuprins

I	Calculul inductanțelor bobinelor traductoarelor inductive cu lichid magnetic	4
1	Introducere	5
1.1	Lichide magnetice	5
1.2	Traductoare magnetice	6
1.3	Traductoare cu lichid magnetic	7
1.4	Conținutul tezei	8
2	Calculul analitic al inductanțelor bobinelor traductoarelor inductive cu lichid magnetic folosind inducția magnetică pe axa centrală a bobinei	10
2.1	Bobină în mediu omogen	10
2.2	Bobină în mediu eterogen	13
2.3	Bobină cu miez magnetic lichid	13
3	Calculul analitic al inductanțelor bobinelor traductoarelor inductive cu lichid magnetic folosind inducția magnetică pe întreaga suprafață a spirelor și considerând spirele reale	17
3.1	Inductivitatea unei spire reale în mediu omogen	17
3.2	Calculul inductivității spirei reale în mediu neomogen	19
3.3	Cazul mai multor spire în mediu eterogen	21
3.4	Concluzii	33
4	Calculul analitic al inductanțelor bobinelor traductoarelor inductive cu lichid magnetic folosind inducția magnetică pe întreaga suprafață a spirelor și considerând spirele filiforme	34
4.1	Posibilități de calcul analitic	34
4.2	Cazul unui element de circuit în prezența lichidului magnetic	38
4.3	Cazul unui element de bobină în prezența lichidului magnetic	41
4.4	Cazul întregii bobine	45
4.5	Concluzii	50
5	Calculul numeric al inductanțelor bobinelor traductoarelor inductive cu lichid magnetic	51
5.1	Bobina reală	51
5.2	Domeniul bidimensional de analiză al câmpului	52
5.3	Condiții generale de trecere la suprafețele de separație dintre două medii diferite	54

5.3.1	Condițiile de trecere pentru suprafețele cilindrice verticale ($\vec{t} = \vec{u}_z$), cu permeabilități magnetice diferite și fără curenți superficiali ($\vec{J}_s = 0$).	55
5.3.2	Condițiile de trecere pentru suprafețele cilindrice verticale ($\vec{t} = \vec{u}_z$), având aceleași permeabilități magnetice și fiind parcurse de curenți superficiali ($\vec{J}_s = J_{s\varphi} \cdot \vec{u}_\varphi = J_s \cdot \vec{u}_\varphi$).	55
5.3.3	Condițiile de trecere pentru suprafețele plane orizontale ($\vec{t} = \vec{u}_r$), cu permeabilități magnetice diferite și fără curenți superficiali ($\vec{J}_s = 0$).	56
5.3.4	Condițiile de trecere pentru suprafețele plane orizontale ($\vec{t} = \vec{u}_r$), având aceleași permeabilități magnetice, parcurse de curenți superficiali ($\vec{J}_s = J_{s\varphi} \cdot \vec{u}_\varphi = J_s \cdot \vec{u}_\varphi$).	56
5.4	Stabilirea relațiilor de calcul prin metoda diferențelor finite.	57
5.4.1	Relații de calcul pentru interiorul volumului parcurs de curent.	57
5.4.2	Relații de calcul pentru interiorul volumelor fără densitate de curent.	59
5.4.3	Relații de calcul pentru suprafețele cilindrice verticale	59
5.4.4	Relații de calcul pentru suprafețele plane orizontale	60
5.5	Descrierea programului de calcul. Situația bobinei necranate	60
5.6	Situația bobinei ecranate	75
6	Verificări experimentale asupra bobinei	76
6.1	Principiul de verificare	76
6.2	Instalația experimentală	80
6.3	Rezultatele măsurătorilor experimentale	80
6.4	Comparație cu variantele calculate numeric	89
 II Aplicațiile în tehnică ale traductoarelor inductive diferențiale cu lichid magnetic		90
7	Traductoare diferențiale cu lichid magnetic.	91
7.1	Diferența de inductivitate. Liniaritatea traductoarelor	91
7.2	Eroarea relativă de neliniaritate	94
8	Principiul electric de măsurare a diferenței de inductivitate	95
8.1	Expresia tensiunii diferențiale U_d și U_{dmed}	95
8.2	Aducerea la zero a tensiunii U_{dmed}	96
8.3	Liniaritatea principiului de măsurare	97
8.3.1	Cazul semnalului pilot în fază cu tensiunea de alimentare a punții	97
8.3.2	Cazul semnalului pilot de comandă defazat	97
8.4	Concluzii	99
9	Aplicații ale traductoarelor inductive diferențiale cu lichid magnetic	101
9.1	Traductorul diferențial de presiune pentru gaze	101
9.2	Traductorul diferențial de înclinare	102
9.2.1	Traductorul diferențial de înclinare unidirecțional	102
9.2.2	Traductorul diferențial de înclinare bidirecțional	102
9.3	Debitmetrul volumic pentru gaze	103
9.4	Detectorul de debit de scăpări pentru gaze	104

9.4.1	Funcționarea schemei pneumatice	105
9.4.2	Utilizarea traductorului de presiune diferențială pentru gaze	105
9.4.3	Utilizarea detectorului de debit de scăpări magnetofluidic	106
9.5	Contorul de debit volumic pentru gaze	107
9.5.1	Funcționarea sesizorului	108
9.5.2	Funcționarea sistemului electronic	108
9.6	Modularizarea familiei de traductoare inductive cu lichid magnetic pentru mărimi aerodinamice și înclinare	110
9.6.1	Traductorul de presiune diferențială	111
9.6.2	Clinometrul unidirecțional	112
9.6.3	Debitmetrul. Detectorul DDS-01	112
9.6.4	Contorul de gaz cu totalizator electronic	113
9.6.5	Clinometrul bidirecțional	113
9.7	Observații	113
10	Alte tipuri de traductoare inductive cu lichid magnetic realizate de au- tor	138
10.1	Debite de gaz foarte mici	138
10.1.1	Realizarea unui stand pentru experimentarea traductorului de debit de gaz sub 3 l/h	139
10.1.2	Experimentarea modelului de traductor de debit	139
10.2	Traductorul cu rezervor orizontal	149
10.2.1	Traductorul cu rezervor și în exteriorul bobinei	149
10.2.2	Traductorul cu rezervor strict în interiorul bobinei	149
11	Concluzii	150
11.1	Concluzii generale	150
11.2	Contribuții personale	151
11.3	Perspectivă	152
12	Anexa A	153
12.1	Explicarea variabilelor	153
12.2	Date de intrare	155
12.3	Testarea rețelei de discretizare	155
12.4	Generarea rețelei de discretizare	156
12.5	Generarea coordonatelor	157
12.6	Înscrierea valorilor inițiale ale potențialului magnetic vector	158
12.7	Inițializarea analogică	158
12.8	Calculul iterativ al potențialului magnetic vector prin metoda diferențelor finite	160
12.9	Calculul erorii relative a potențialului magnetic vector	163
12.10	Calculul componentei axiale a inducției magnetice	165
12.11	Generarea absciselor pentru inducția magnetică	167
12.12	Calculul inductanței bobinei	168
12.13	Calculul erorii relative de neliniaritate a inductanței bobinei	169
	Bibliografie	170

Partea I

Calculul inductanțelor bobinelor traductoarelor inductive cu lichid magnetic

1

Introducere

1.1 Lichide magnetice

Lichidele magnetice (fluidele magnetice sau ferrofluidele [1] . . . [14]) sunt suspensii coloidale stabile de particule monodomenice feromagnetice sau ferimagnetice, ca de exemplu magnetita (Fe_3O_4), dispersate în diferite lichide de bază. Particulele magnetice ultrafine, având diametrul de circa 30 . . . 150 Å se integrează în structura lichidului de bază prin intermediul unui strat stabilizant de substanță organică care formează un înveliș elastic al acestora și care, împreună cu mișcarea de agitație termică, asigură stabilitatea suspensiei coloidale chiar și în prezența câmpurilor magnetice neuniforme intense. Datorită prezenței unui număr de circa 10^{17} . . . 10^{18} asemenea particule magnetice într-un centimetru cub, lichidele magnetice se comportă ca un mediu omogen și însușează proprietățile unui lichid cu acelea ale unui mediu magnetizabil. Proprietățile microstructurale, reologice, termice, electrice și optice ale lichidelor magnetice nu mai sunt identice cu ale lichidului de bază și, în plus, ele pot fi controlate de către câmpul magnetic exterior.

Dezvoltarea spectaculoasă a cercetărilor din domeniul fluidelor magnetice, pe plan internațional, care a avut loc mai ales în ultimii 20 de ani, este ilustrată prin numărul foarte mare de lucrări științifice și de patente ([15]). Conferințele Internaționale de Fluide Magnetice, organizate începând din anul 1977, la fiecare 3 ani (1977-Udine-Italia, 1980-Mariott Inn-SUA, 1983-Bangor-Marea Britanie, 1986-Sendai-Japonia, 1989-Riga-Letonia, 1992-Paris-Franța, 1995-Bhavnagar-India), demonstrează de asemenea interesul pe care comunitatea științifică internațională îl acordă acestui domeniu.

În România, fluidele magnetice au început a fi preparate și studiate pentru prima oară de către un colectiv de la Institutul Politehnic "Gheorghe Asachi" din Iași, condus de către Prof.dr. E.Luca. Este demn de remarcat faptul că, printre primele lucrări de sinteză privind domeniul fluidelor magnetice, apărute pe plan mondial, se numără și două cărți în limba română, editate de către acest colectiv ([3, 4]).

De aproape 20 de ani, cercetări sistematice privind prepararea, proprietățile și aplicațiile fluidelor magnetice sunt efectuate de către un colectiv interdisciplinar condus de Acad. I.Anton, colectiv care astăzi își desfășoară activitatea la Centrul de Cercetări de Hidrodinamică, Cavitație și Lichide Magnetice (C.C.H.C.L.M.) din cadrul Universității "Politehnica" din Timișoara.

Datorită faptului că România a fost printre primele țări care au deținut tehnologii proprii de preparare a lichidelor magnetice, numeroase alte colective din țară au dezvoltat cercetări originale privind proprietățile și aplicațiile acestora. Rezultatele obținute în

acest domeniu de către cercetătorii români se regăsesc în circa 200 de lucrări științifice publicate și 60 de brevete de invenție [16]. De asemenea interesul manifestat la Universitatea "Politehnica" din Timișoara privind domeniul lichidelor magnetice a permis și favorizat elaborarea a numeroase teze de doctorat având drept doctoranzi și/sau conducători științifici specialiști din cadrul C.C.H.C.L.M.:

- A.Colțeu - conducător științific Prof.dr.ing. I.De Sabata,
- B.Nicoară - conducător științific Prof.dr.ing. I.De Sabata,
- L.Gabor - conducător științific Prof.dr.ing. Z.Gropșian,
- M.M.Rădulescu - conducător științific Prof.dr.ing. I.De Sabata,
- Doina Bica - conducător științific Prof.dr.ing. V.Părăușanu - Universitatea Politehnică București,
- V.Sofonea - conducător științific Acad. I.Ioviț-Popescu - Universitatea din București.

Seminarul Național de "Lichide Magnetice și Aplicații", organizat la Timișoara și care, în anul 1994, a ajuns la cea de-a IV-a ediție, cu participare internațională, ilustrează de asemenea amploarea cercetărilor efectuate pe plan național în acest domeniu.

Ca o recunoaștere a activității desfășurate la Timișoara de-a lungul timpului în domeniul lichidelor magnetice Acad. I.Anton (directorul C.C.H.C.L.M.) este membru al Comitetului Internațional de Redacție al revistei *Magnetohydrodynamics* a Academiei de Științe din Letonia (Riga) iar Dr.fiz. L.Vékás (Șeful Laboratorului de Lichide Magnetice) este membru în Comitetul Director Internațional de Fluide Magnetice.

Acest comitet internațional a decis ca următoarea Conferință Internațională de Fluide Magnetice să aibă loc în România, la Timișoara (1998).

1.2 Traductoare magnetice

Operația de măsurare ca o comparație direct perceptibilă a mărimii de măsurat cu unitatea de măsură nu este posibilă decât într-un număr restrâns de cazuri. Restricțiile apar pe de o parte prin faptul că există numeroase mărimi fizice ce nu sunt accesibile simțurilor umane, iar pe de altă parte chiar și în cazul celor care posedă această proprietate, numai un domeniu limitat de valori poate fi sesizat.

De cele mai multe ori între mărimea de măsurat și organele de percepție este necesar să se intercaleze anumite dispozitive care, acționate de mărimea respectivă pe baza energiei asociate acesteia sau a unei energii auxiliare de activare, determină apariția unor efecte posibil de a fi percepute. Pe baza acestor considerente se poate defini noțiunea de aparat de măsurat ([17]):

Acel dispozitiv care stabilește o dependență între mărimea de măsurat și o alta ce poate fi percepută în mod nemijlocit de organele de simț umane, astfel încât permite determinarea valorii mărimii respective pe baza unei scări de măsurare, se numește **aparat de măsurat**.

În instalațiile automate, unde intervenția directă a omului este eliminată, aparatul de măsurat este numit **traductor** și el stabilește o corespondență între mărimea de măsurat și o mărime etalonată conform unei scări de măsurare, aptă de a fi prelucrată de elemente de automatizare sau echipamente de calcul. De aici faptul că, după unii autori, prin traductor se înțelege un aparat de măsurat care are la ieșire un semnal electric.

Dealtfel, la ora actuală, în literatura de specialitate ([18] ... [22]), noțiunile de: instrument de măsurat, aparat de măsurat, instalație de măsurat, sistem de măsurat, lanț de

măsurare, echipament de măsurare, traductor, detector, sesizor, element sensibil, convertor, adaptor, interfață, etc., nu sunt suficient de bine precizate, gradul lor de abstractizare diferind foarte mult de la un autor la altul și chiar în cazul aceluiași autor, de la un context la altul ([21, 22]).

În cadrul prezentei lucrări, prin noțiunea de traductor se înțelege cea mai simplă construcție tehnică de un anumit tip, destinată obținerii unui semnal electric proporțional cu o anumită mărime fizică ce se dorește a fi măsurată. Orice abatere de la acest înțeles al noțiunii de traductor, în sensul creșterii complexității constructive, se va preciza în detaliu în contextul respectiv.

O clasificare generală a traductoarelor se poate face astfel ([19]):

1. După principiul energetic de funcționare:
 - traductoare generatoare, care furnizează un semnal electric fără a fi alimentate cu putere electrică;
 - traductoare parametrice, care necesită alimentare electrică pentru a furniza semnalul de ieșire.
2. După natura mărimilor furnizate la ieșire:
 - traductoare analogice, care furnizează la ieșire un semnal variabil continuu, proporțional cu mărimea măsurată;
 - traductoare digitale, care furnizează un semnal electric discontinuu.
3. După mărimea de intrare:
 - traductoare pentru mărimi geometrice;
 - traductoare pentru mărimi mecanice;
 - traductoare pentru mărimi de material;
 - etc.

În toate cazurile prezentate mai sus, funcționarea traductoarelor se poate baza pe:

- modificarea unor mărimi fizice sau constante de material de tip electric (permitivitate dielectrică, conductivitate, capacitate, tensiune electrică imprimată, etc.), caz în care traductorul se numește electric sau capacitiv;
- modificarea unor mărimi fizice sau constante de material de tip magnetic (permeabilitate magnetică, inductivitate, tensiune indusă, etc.), caz în care traductorul se numește **magnetic** sau **inductiv**.

Traductoarele inductive au luat o amploare deosebită mai cu seamă sub aspectul realizării lor practice. Literatura de specialitate este foarte săracă în referiri teoretice pe de o parte datorită dificultăților în abordarea acestor aspecte, iar pe de altă parte pentru că acestea constituie secrete de fabricație ([23]).

1.3 Traductoare cu lichid magnetic

În prezent, traductoare cu lichid magnetic pot fi găsite în oricare din clasele și subclasele 1 ... 3 prezentate mai sus. Acest lucru se datorează faptului că prezența lichidului magnetic în construcția traductorului poate fi determinată de una din proprietățile secundare ale lichidului magnetic, cum ar fi de exemplu levitația magnetofluidică de ordinul I sau II.

Prezenta lucrare se referă strict la traductoarele inductive cu lichid magnetic de tip analogic, parametrice, în care prezența lichidului magnetic în construcția traductorului este determinată de proprietatea acestuia de a avea permeabilitatea magnetică relativă mai mare decât 1. În acest caz lichidul magnetic joacă rol de miez magnetic lichid al unor bobine.

Trebuie subliniat caracterul original al acestor traductoare, precum și faptul că au fost printre primele realizate și experimentate de acest gen ([24]). Din punct de vedere al mărimilor de intrare s-a dezvoltat o întreagă familie de traductoare de acest tip, pentru măsurători aerodinamice, înclinare sau accelerație, [25] fiind primul catalog de produse de acest fel.

În ultima perioadă au apărut o serie de lucrări referitoare la traductoare similare ([26] ... [35]), adică inductive, de construcție diferită motivate de multitudinea aplicațiilor urmărite: măsurarea unor diferențe de presiune mici și foarte mici, a accelerațiilor sau unghiurilor de înclinare în cazul roboților, celulelor solare sau a antenelor pentru sateliți, înregistrarea cu sensibilitate ridicată a mișcărilor seismice și altele. Faptul că traductoarele cu lichid magnetic, în special cele inductive, câștigă treptat teren, se explică prin simplitatea și caracterul robust al construcției, respectiv prin posibilitatea miniaturizării lor.

1.4 Conținutul tezei

Cuprinzând 11 capitole grupate în două părți distincte, lucrarea și-a propus să pună la dispoziția celor interesați relațiile de calcul necesare în proiectarea unor traductoare magnetofluidice inductive pentru mărimi aerodinamice (Partea I) și să exemplifice concret câteva din aplicațiile posibile ale acestor tipuri de traductoare (Partea II). Pentru stabilirea relațiilor de calcul s-au abordat atât posibilitățile de calcul analitic (capitolele 2 ... 4) cât și cele de calcul numeric (capitolele 5 și 6) rezultate din simularea pe calculator a câmpului magnetic al traductorului elementar.

Posibilitățile de calcul analitic prezentate se bazează pe utilizarea metodei imaginilor pentru calculul câmpului magnetic în mediu neomogen, metodă care duce la obținerea unor relații de calcul diferite pentru punctele spațiului aflate în medii diferite. S-a luat în considerare atât cazul unei bobine reale (capitolul 3) cât și cazul unei bobine filiforme (capitolele 2 și 4).

În toate calculele din capitolele 2 ... 5 lichidul magnetic este considerat liniar deoarece intensitatea câmpului magnetic (H) fiind mică, se lucrează pe porțiunea liniară a curbei de magnetizare. În abordarea diverselor posibilități de calcul al inductanțelor bobinelor traductoarelor inductive cu lichid magnetic se evoluează de la simplu la complex, respectiv, de la situații în care modelul teoretic folosit aproximează grosier realitatea dar se obțin relații matematice simple, la situații în care modelul teoretic folosit aproximează mai exact realitatea dar relațiile matematice obținute sunt mai dificile.

Astfel, în capitolul 2 se admite o valoare constantă a vectorului inducție magnetică pe întreaga suprafață a spirelor bobinei (considerată filiformă), valoare egală cu cea din centrul spirei circulare. Integralele la care se ajunge au drept primitive expresii algebrice simple iar relația finală este de asemenea o expresie algebrică simplă ((2.14) sau (2.15)).

În capitolul 3 spirele sunt considerate reale, vectorul inducție magnetică nu mai este constant pe suprafața spirelor, dar, integralele la care se ajunge sunt eliptice iar relația

finală este o sumă finită de integrale eliptice complete de speța I și II ((3.80)).

Datorită raportului foarte mare între diametrul secțiunii transversale a bobinei circulare și diametrul conductorului, modelul teoretic de bobină filiformă este de preferat și drept urmare capitolul 4 analizează cazul general al bobinei filiforme, când vectorul inducție magnetică nu mai este constant pe toată suprafața spirei filiforme circulare. Egalitatea (2.14) devine astfel un caz particular al egalității (4.47) dar exprimarea primitivei din integrala dublă a relației (4.47) duce la expresii analitice foarte complicate ((4.49) sau (4.56)).

Capitolul 5 admite prezența lichidului magnetic strict în interiorul bobinei, metoda imaginilor nu se mai poate aplica și se trece la simularea numerică a câmpului magnetic al bobinei. Pentru simularea numerică a câmpului magnetic al traductorului elementar s-a folosit metoda diferențelor finite pentru situația câmpului plan-meridian. Comparația dintre rezultatele calculului numeric și măsurătorile experimentale este ilustrată în capitolul 6.

Utilizarea traductorului elementar în montaj diferențial este descrisă în capitolele 7 și 8 unde se analizează și principiul electric de măsurare a diferenței de inductivitate. Capitolele 9 și 10 prezintă aplicațiile traductoarelor inductive cu lichid magnetic la măsurarea unor mărimi aerodinamice și înclinării iar capitolul 11 este rezervat concluziilor finale.

* * *

Doresc să aduc cele mai sincere și alese mulțumiri domnului Prof.dr.ing. Ioan De Sabata, conducătorul științific al lucrării, pentru încrederea, sprijinul și competența cu care m-a îndrumat pe tot parcursul elaborării acestei teze.

Mulțumesc și pe această cale domnului Academician Ioan Anton, directorul Centrului de Cercetări de Hidrodinamică Cavitație și Lichide Magnetice, atât pentru îndemnul dat la începutul acestei lucrări cât și pentru condițiile de lucru asigurate în toată această perioadă.

Domnului C.ș.p.I dr.fiz. Ladislau Vékás, șeful Laboratorului de Lichide Magnetice și domnului C.ș.p.II ing. Iosif Potencz le mulțumesc pentru generozitatea manifestată în formarea mea ca cercetător științific și pentru sprijinul acordat la elaborarea și finalizarea tezei.

Mulțumesc cu căldură întregului colectiv al Centrului de Cercetări de Hidrodinamică, Cavitație și Lichide Magnetice, din Universitatea "Politehnica" Timișoara pentru atmosfera de lucru și înțelegerea dovedite.

Lucrarea de față a fost realizată pe baza rezultatelor obținute în cadrul unor contracte de cercetare științifică finanțate de-a lungul timpului de către AEM-S.A. Timișoara, Ministerul Învățământului și Științei, respectiv Ministerul Cercetării și Tehnologiei. Execuția și omologarea produselor "DDS-01" și "DBDO-01" descrise în capitolul 9 s-a făcut de către un colectiv de specialiști din cadrul AEM-S.A. Timișoara, sub conducerea domnului Prof.dr.ing. Gheorghe Tîrpe.

Din rezultatele mai ample în domeniul traductoarelor cu lichid magnetic obținute până la această dată de întreg colectivul Centrului de Cercetări de Hidrodinamică, Cavitație și Lichide Magnetice, în prezenta lucrare sunt prezentate strict calculele analitice, programele pentru calculator, proiectele, realizările practice și măsurătorile experimentale efectuate de autor sub directa îndrumare a conducătorului științific.

* * *

2

Calculul analitic al inductanțelor bobinelor traductoarelor inductive cu lichid magnetic folosind inducția magnetică pe axa centrală a bobinei

2.1 Bobină în mediu omogen

Dimensionarea traductoarelor inductive cu lichid magnetic, recent apărute în tehnica măsurării [36, 37], a generat și unele probleme fundamentale, printre care variația inductanței unei bobine în funcție de înălțimea relativă a miezului magnetic lichid al acesteia. În literatura de specialitate nu se cunoaște o expresie analitică generală pentru inductanța unei bobine plasate în mediu eterogen. Considerând lichidul magnetic ca fiind un mediu liniar (intensitatea câmpului magnetic este mică deci se lucrează pe porțiunea liniară a curbei de magnetizare), omogen și fără magnetizație permanentă, se prezintă în continuare deducerea unei relații analitice originale care să exprime inductivitatea unei bobine funcție de nivelul lichidului magnetic (relația (2.14) sau (2.15)). Ca model teoretic se acceptă o bobină cu spire filiforme, cufundată parțial în lichid magnetic iar vectorul inducție magnetică are aceeași valoare în toate punctele din planul unei spire, valoare egală cu cea din centrul spirei.

Se știe că vectorul inducție magnetică, produs de o bobină cilindrică, de secțiune circulară uniform bobinată cu N spire (fig. 2.1) pe axa centrală a bobinei are expresia:

$$\vec{B} = \frac{\mu N^* i_c}{2} \cdot (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1) \cdot \vec{u}_B \quad (2.1)$$

în care α_1 și α_2 sunt unghiurile din figură, $N^* = \frac{N}{l}$ reprezintă numărul de spire pe unitatea de lungime a bobinei, \vec{u}_B - versorul inducției, μ - permeabilitatea magnetică absolută a mediului iar i_c - intensitatea curentului.

Pentru punctul P_1 situat în interiorul bobinei, la distanța x de capătul ei, egalitatea (2.1) poate fi pusă în forma:

$$\vec{B} = \frac{\mu N^* i_c}{2} \cdot \left[\frac{x}{\sqrt{x^2 + R^2}} + \frac{l - x}{\sqrt{(l - x)^2 + R^2}} \right] \cdot \vec{u}_B \quad (2.2)$$

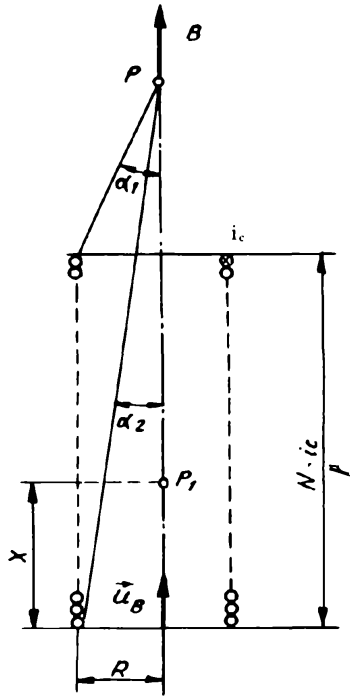


Figura 2.1: Bobină electrică în mediu omogen și punctul P în interiorul ei

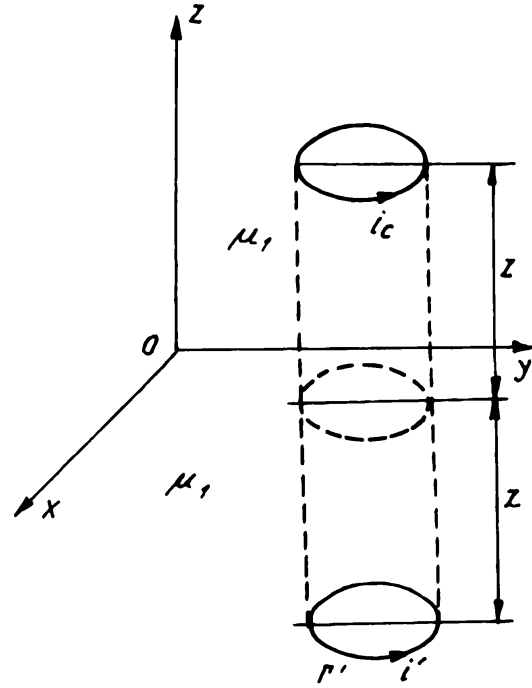


Figura 2.3: Generarea câmpului magnetic în mediul μ_1

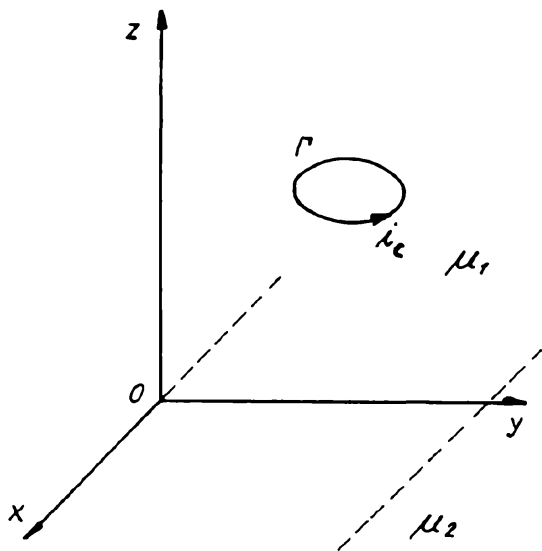


Figura 2.2: Spiră filiformă plană în prezența a două medii diferite

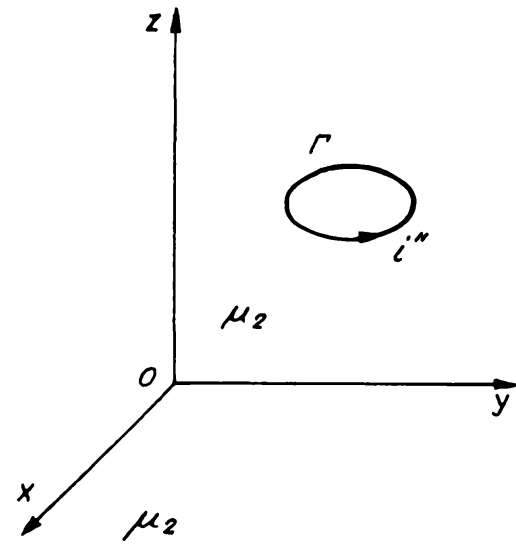


Figura 2.4: Generarea câmpului magnetic în mediul μ_2

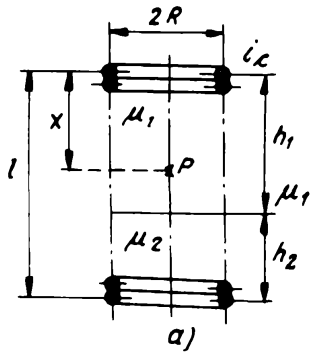


Figura 2.5: Bobină cilindrică având în interior două medii diferite.

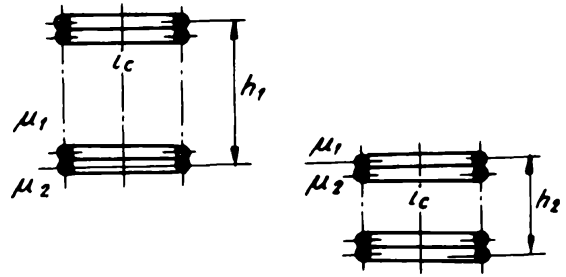


Figura 2.7: Descompunerea modelului teoretic din figura 2.6

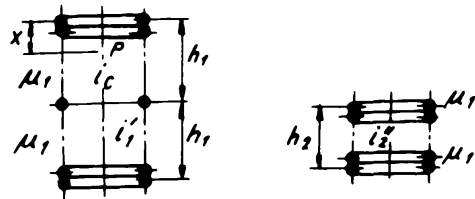


Figura 2.8: Bobinele care generează câmpul magnetic în mediul μ_1

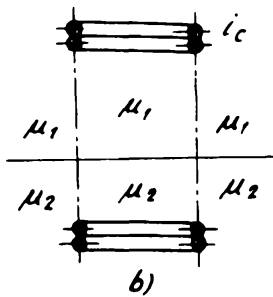


Figura 2.6: Modelul teoretic acceptat pentru bobina din figura anterioară.

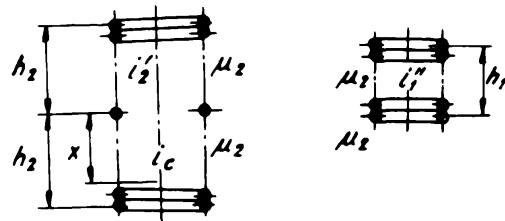


Figura 2.9: Bobinele care generează câmpul magnetic în mediul μ_2

2.2 Bobină în mediu eterogen

Fie un circuit filiform plan parcurs de curentul i_c , situat în semispațiul având permeabilitatea μ_1 constantă, celălalt semispațiu are permeabilitatea μ_2 și ea constantă (fig. 2.2).

Circuitul se găsește într-un plan paralel cu suprafața de separație dintre medii. Câmpul determinat de circuit se poate calcula cu metoda imaginilor electrice după cum urmează ([38, 39]):

- Câmpul în mediul μ_1 se presupune produs de circuitul dat împreună cu circuitul imagine în raport cu suprafața de separație dintre medii, dar parcurs de curentul i' (fig. 2.3). Ambele circuite sunt situate într-un mediu omogen cu permeabilitatea magnetică μ_1
- Câmpul în mediul μ_2 se presupune generat de circuitul filiform dat situat într-un mediu omogen de permeabilitatea μ_2 și parcurs de curentul i'' (fig. 2.4).

În ipotezele menționate, valorile curenților i' și i'' sunt:

$$i' = \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2 + \mu_1} \cdot i_c \quad (2.3)$$

$$i'' = \frac{2\mu_1}{\mu_2 + \mu_1} \cdot i_c \quad (2.4)$$

2.3 Bobină cu miez magnetic lichid

Se consideră o bobină cilindrică, de secțiune circulară cu raza R , având în interior două medii separate printr-un plan cum indică fig. 2.5. Dacă lungimea bobinei este mai mare ca diametrul său și permeabilitățile magnetice relative ale mediilor μ_{r1} respectiv μ_{r2} sunt mici, câmpul din exteriorul bobinei este și el mic și, deci, putem accepta pentru calculul câmpului din interiorul bobinei, modelul teoretic reprezentat în fig. 2.6.

Considerând mediile liniare, cu teorema superpoziției câmpul se descompune în stările reprezentate în fig. 2.7, care pot fi tratate după metodologia descrisă anterior ([40]).

Astfel în mediul cu permeabilitate μ_1 câmpul va fi dat de bobinele reprezentate în fig. 2.8, iar în cel de-al doilea mediu de bobinele desenate în fig. 2.9, în care:

$$i'_1 = \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2 + \mu_1} \cdot i_c \quad i''_2 = \frac{2\mu_2}{\mu_2 + \mu_1} \cdot i_c \quad (2.5)$$

și analog

$$i'_2 = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_2 + \mu_1} \cdot i_c \quad i''_1 = \frac{2\mu_1}{\mu_2 + \mu_1} \cdot i_c \quad (2.6)$$

În continuare se vor calcula vectorii \vec{B}_1 , respectiv \vec{B}_2 , situați pe axa bobinei în puncte din primul, respectiv al doilea mediu. Aplicând formula (2.2) avem:

$$\vec{B}_1 = \left\{ \frac{\mu_1 N^* i_c}{2} \cdot \left[\frac{x}{\sqrt{x^2 + R^2}} + \frac{h_1 - x}{\sqrt{(h_1 - x)^2 + R^2}} \right] + \right.$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{\mu_1 N^* i'_1}{2} \cdot \left[\frac{2h_1 - x}{\sqrt{(2h_1 - x)^2 + R^2}} - \frac{h_1 - x}{\sqrt{(h_1 - x)^2 + R^2}} \right] + \\
& + \frac{\mu_1 N^* i''_2}{2} \cdot \left[\frac{l - x}{\sqrt{(l - x)^2 + R^2}} - \frac{h_1 - x}{\sqrt{(h_1 - x)^2 + R^2}} \right] \} \cdot \vec{u}_B
\end{aligned}$$

care ținând seama de (2.5) se aduce în forma:

$$\begin{aligned}
\vec{B}_1 = & \frac{\mu_1 N^* i_c}{2} \cdot \left[\frac{x}{\sqrt{x^2 + R^2}} + 2 \cdot \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_1 + \mu_2} \cdot \frac{h_1 - x}{\sqrt{(h_1 - x)^2 + R^2}} + \right. \\
& \left. + \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2 + \mu_1} \cdot \frac{2h_1 - x}{\sqrt{(2h_1 - x)^2 + R^2}} + \frac{\mu_2}{\mu_1 + \mu_2} \cdot \frac{l - x}{\sqrt{(l - x)^2 + R^2}} \right] \cdot \vec{u}_B \quad (2.7)
\end{aligned}$$

În cel de-al doilea mediu avem:

$$\begin{aligned}
\vec{B}_2 = & \left[\frac{\mu_2 N^* i''_1}{2} \cdot \left(\frac{h_1 + x'}{\sqrt{(h_1 + x')^2 + R^2}} - \frac{x'}{\sqrt{x'^2 + R^2}} \right) + \right. \\
& + \frac{\mu_2 N^* i'_2}{2} \cdot \left(\frac{h_2 + x'}{\sqrt{(h_2 + x')^2 + R^2}} - \frac{x'}{\sqrt{x'^2 + R^2}} \right) + \\
& \left. + \frac{\mu_2 N^* i_c}{2} \cdot \left(\frac{x'}{\sqrt{x'^2 + R^2}} + \frac{h_2 - x'}{\sqrt{(h_2 - x')^2 + R^2}} \right) \right] \cdot \vec{u}_B
\end{aligned}$$

în care x' este cota punctului P măsurată de la suprafața de separație (fig. 2.10).

Cu (2.6) egalitatea anterioară se pune în forma:

$$\begin{aligned}
\vec{B}_2 = & \frac{\mu_2 N^* i_c}{2} \cdot \left[2 \frac{\mu_2 \mu_1}{\mu_2 + \mu_1} \cdot \frac{x'}{\sqrt{x'^2 + R^2}} + \frac{2\mu_1}{\mu_2 + \mu_1} \cdot \frac{h_1 + x'}{\sqrt{(h_1 + x')^2 + R^2}} + \right. \\
& \left. + \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_2 + \mu_1} \cdot \frac{h_2 + x'}{\sqrt{(h_2 + x')^2 + R^2}} + \frac{h_2 - x'}{\sqrt{(h_2 - x')^2 + R^2}} \right] \cdot \vec{u}_B \quad (2.8)
\end{aligned}$$

Din (2.7) pentru $x = h_1$ și din (2.8) pentru $x' = 0$ rezultă că la suprafața de separație, vectorii sunt egali, adică se satisface teorema de continuitate a componentelor normale ale inducției magnetice.

$$\vec{B}_1(x = h_1) = \vec{B}_2(x' = 0) = \frac{N^* \mu_1 \mu_2 i_c}{\mu_1 + \mu_2} \cdot \left(\frac{h_1}{\sqrt{h_1^2 + R^2}} + \frac{h_2}{\sqrt{h_2^2 + R^2}} \right) \cdot \vec{u}_B$$

Fluxul total al întregii bobine va fi determinat de suma fluxurilor totale ale celor două bobine

$$\Psi = \Psi_1 + \Psi_2.$$

Operând cu valoarea inducției de pe ax considerată aceeași pe toată suprafața spirei, aproximație acceptabilă pentru diametre mici, avem:

$$d\Psi_1 = \pi R^2 B_1 N^* dx, \quad \text{respectiv} \quad d\Psi_2 = \pi R^2 B_2 N^* dx'$$

Deci,

$$\begin{aligned}
\Psi_1 &= \pi R^2 N^* \int_0^{h_1} B_1 \cdot dx = \\
&= \frac{\pi \mu_1 R^2 N^{*2} i_c}{2} \cdot \left[\int_0^{h_1} \frac{x \cdot dx}{\sqrt{x^2 + R^2}} + 2 \cdot \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_1 + \mu_2} \int_0^{h_1} \frac{h_1 - x}{\sqrt{(h_1 - x)^2 + R^2}} \cdot dx \right. \\
&\quad \left. + \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_1 + \mu_2} \cdot \int_0^{h_1} \frac{2h_1 - x}{\sqrt{(2h_1 - x)^2 + R^2}} \cdot dx + \frac{2\mu_2}{\mu_1 + \mu_2} \cdot \int_0^{h_1} \frac{l - x}{\sqrt{(l - x)^2 + R^2}} \cdot dx \right]
\end{aligned} \tag{2.9}$$

și

$$\begin{aligned}
\Psi_2 &= \frac{\pi \mu_1 R^2 N^{*2} i_c}{2} \cdot \left[\frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_1 + \mu_2} \cdot \int_0^{h_2} \frac{x' \cdot dx'}{\sqrt{x'^2 + R^2}} + \frac{2\mu_1}{\mu_1 + \mu_2} \cdot \int_0^{h_2} \frac{h_1 + x'}{\sqrt{(h_1 + x')^2 + R^2}} \cdot dx' + \right. \\
&\quad \left. + \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_1 + \mu_2} \cdot \int_0^{h_2} \frac{h_2 + x'}{\sqrt{(h_2 + x')^2 + R^2}} \cdot dx' + \int_0^{h_2} \frac{h_2 - x'}{\sqrt{(h_2 - x')^2 + R^2}} \cdot dx' \right]
\end{aligned} \tag{2.10}$$

Integralele definite din (2.9) au valorile:

$$\begin{aligned}
\int_0^{h_1} \frac{x \cdot dx}{\sqrt{x^2 + R^2}} &= \sqrt{h_1^2 + R^2} - R \\
\int_0^{h_1} \frac{h_1 - x}{\sqrt{(h_1 - x)^2 + R^2}} \cdot dx &= \sqrt{h_1^2 + R^2} - R \\
\int_0^{h_1} \frac{2h_1 - x}{\sqrt{(2h_1 - x)^2 + R^2}} \cdot dx &= \sqrt{4h_1^2 + R^2} - \sqrt{h_1^2 + R^2} \\
\int_0^{h_1} \frac{l - x}{\sqrt{(l - x)^2 + R^2}} \cdot dx &= \sqrt{l^2 + R^2} - \sqrt{(l - h_1)^2 + R^2}
\end{aligned}$$

și deci (2.9) devine:

$$\begin{aligned}
\Psi_1 &= \frac{\pi \mu_1 R^2 N^{*2} i_c}{2} \cdot \left[2 \cdot \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_1 + \mu_2} \cdot \sqrt{h_1^2 + R^2} - \frac{3\mu_1 - \mu_2}{\mu_1 + \mu_2} \cdot R + \right. \\
&\quad \left. + \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2 + \mu_1} \cdot \sqrt{4h_1^2 + R^2} + \frac{2\mu_2}{\mu_1 + \mu_2} \cdot (\sqrt{l^2 + R^2} - \sqrt{(l - h_1)^2 + R^2}) \right]
\end{aligned} \tag{2.11}$$

Integralele din (2.10) au valorile:

$$\begin{aligned}
\int_0^{h_2} \frac{x' \cdot dx'}{\sqrt{x'^2 + R^2}} &= \sqrt{h_2^2 + R^2} - R \\
\int_0^{h_2} \frac{h_1 + x'}{\sqrt{(h_1 + x')^2 + R^2}} \cdot dx' &= \sqrt{l^2 + R^2} - \sqrt{h_1^2 + R^2} \\
\int_0^{h_2} \frac{h_2 - x'}{\sqrt{(h_2 + x')^2 + R^2}} \cdot dx' &= \sqrt{4h_2^2 + R^2} - \sqrt{h_2^2 + R^2} \\
\int_0^{h_2} \frac{h_2 - x'}{\sqrt{(h_2 - x')^2 + R^2}} \cdot dx' &= \sqrt{h_2^2 + R^2} - R
\end{aligned}$$

și deci:

$$\Psi_2 = \frac{\pi \mu_2 R^2 N^{*2} i_c}{2} \cdot \left[2 \cdot \frac{2\mu_2 - \mu_1}{\mu_1 + \mu_2} \cdot \sqrt{h_2^2 + R^2} - \frac{3\mu_2 - \mu_1}{\mu_1 + \mu_2} \cdot R + \right. \\ \left. + \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_2 + \mu_1} \cdot \sqrt{4h_2^2 + R^2} + \frac{2\mu_1}{\mu_1 + \mu_2} \cdot (\sqrt{l^2 + R^2} - \sqrt{h_1^2 + R^2}) \right] \quad (2.12)$$

Inductivitatea bobinei, în aproximațiile menționate, după calcule algebrice simple, rezultă în forma:

$$L = \frac{\Psi_1 + \Psi_2}{i} = \frac{\pi R^2 N^{*2}}{2} \cdot \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_1 + \mu_2} \cdot [4\mu_2 \sqrt{h_2^2 + R^2} - 4\mu_1 \sqrt{h_1^2 + R^2} + \\ \frac{4\mu_1 \mu_2}{\mu_2 - \mu_1} \cdot \sqrt{l^2 + R^2} - \frac{3(\mu_2^2 + \mu_1^2) - 2\mu_1 \mu_2}{\mu_2 - \mu_1} \cdot R + \mu_1 \sqrt{4h_1^2 + R^2} - \mu_2 \sqrt{4h_2^2 + R^2}] \quad (2.13)$$

Exprimăm inductivitatea L în funcție de înălțimea coloanei de lichid magnetic h_2 , notată în continuare cu x ($h_2 = x$). Atunci $h_1 = 1 - x$ și (2.13) devine:

$$L(x) = \frac{\mu_0 \pi R^2 N^{*2}}{2} \frac{\mu_{r2} - \mu_{r1}}{\mu_{r1} + \mu_{r2}} [4\mu_{r2} \sqrt{x^2 + R^2} - \\ - 4\mu_{r1} \sqrt{(1-x)^2 + R^2} + \frac{4\mu_{r1} \mu_{r2}}{\mu_{r2} - \mu_{r1}} \sqrt{l^2 + R^2} - \\ - \frac{3(\mu_{r2}^2 + \mu_{r1}^2) - 2\mu_{r1} \mu_{r2}}{\mu_{r2} - \mu_{r1}} R + \mu_{r1} \sqrt{4(1-x)^2 + R^2} - \\ - \mu_{r2} \sqrt{4x^2 + R^2}] \quad (2.14)$$

unde:

μ_{r1}, μ_{r2} = permeabilitățile magnetice relative ale celor două medii;

μ_0 = permeabilitatea magnetică absolută a vidului;

Cu notațiile:

$$\alpha = \frac{R}{l} \\ t = \frac{x}{l} \quad (0 \leq t \leq 1) \\ \beta = \frac{2\mu_{r1} \mu_{r2}}{\mu_{r2} - \mu_{r1}} \sqrt{1 + \alpha^2} - \frac{3(\mu_{r1}^2 + \mu_{r2}^2) - 2\mu_{r1} \mu_{r2}}{2(\mu_{r2} - \mu_{r1})} \alpha \\ K = \frac{\mu_{r2} - \mu_{r1}}{\mu_{r2} + \mu_{r1}} \mu_0 \pi N^{*2} R^3$$

expresia (2.14) devine (2.15)

$$L(t) = K \frac{1}{\alpha} (2\mu_{r2} \sqrt{t^2 + \alpha^2} - 2\mu_{r1} \sqrt{(1-t)^2 + \alpha^2} + \\ + \frac{\mu_{r1}}{2} \sqrt{4(1-t)^2 + \alpha^2} - \frac{\mu_{r2}}{2} \sqrt{4t^2 + \alpha^2} + \beta) \quad (2.15)$$

și exprimă inductivitatea pentru un set de bobine de raze egale, cu același număr de spire pe unitatea de lungime dar de lungimi diferite, inductivitate funcție de adâncimea relativă de cufundare în lichid magnetic ([41, 42]).

3

Calculul analitic al inductanțelor bobinelor traductoarelor inductive cu lichid magnetic folosind inducția magnetică pe întreaga suprafață a spirelor și considerând spirele reale

3.1 Inductivitatea unei spire reale în mediu omogen

Acceptând modelul teoretic al unei bobine cu spire reale cufundată parțial în lichid magnetic, în acest capitol se prezintă deducerea unei relații analitice originale care exprimă inductivitatea unei bobine reale funcție de nivelul lichidului magnetic (relația (3.80)).

Pentru aceasta se deduce inițial o expresie originală privind inductivitatea unei spire reale plasate în mediu eterogen (relația (3.16)). Considerând bobina ca o sumă finită de spire de acest fel, se scriu relațiile matematice generale care exprimă fluxul inducției magnetice prin orice spiră a bobinei (relațiile (3.50) și (3.51)) precum și egalitățile care exprimă fluxul total ce înlanțuie spirele bobinei (egalitățile (3.60) și (3.71)). Transformând sumele duble în sume simple se obține expresia finală (3.80) care este o sumă finită de integrale eliptice complete de speța I și II și de modul variabil mai mic decât 1.

Utilizând programe de calcul și de reprezentare grafică elaborate de autor, se prezintă grafic diferențele între inductanțele aceluiași bobine calculate prin metode diferite.

În [43] și [44] este dată expresia inductanței mutuale dintre două spire circulare, aflate în plane paralele și situate într-un mediu liniar, omogen, izotrop și fără magnetizație permanentă. Centrele spirelor sunt considerate pe o aceeași dreaptă perpendiculară pe planele spirelor iar mediul are permeabilitatea magnetică μ .

Cu notațiile din figura 3.1, inductanța mutuală este dată de:

$$L_{1,2} = \mu \sqrt{r_1 \cdot r_2} \left\{ \frac{2}{k} [F(k) - E(k)] - kF(k) \right\} \quad (3.1)$$

unde:

$$F(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\beta}{\sqrt{1 - k^2 \cdot \sin^2 \beta}}, \quad \text{respectiv} \quad (3.2)$$

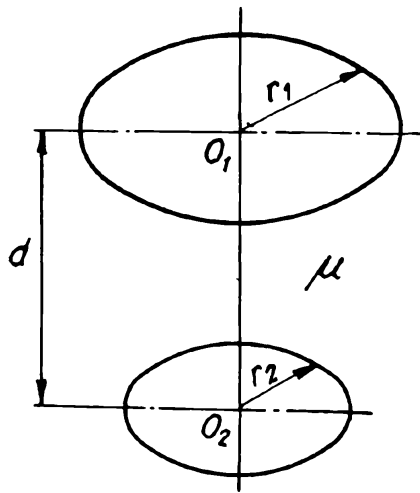


Figura 3.1: Spire circulare filiforme în plane paralele

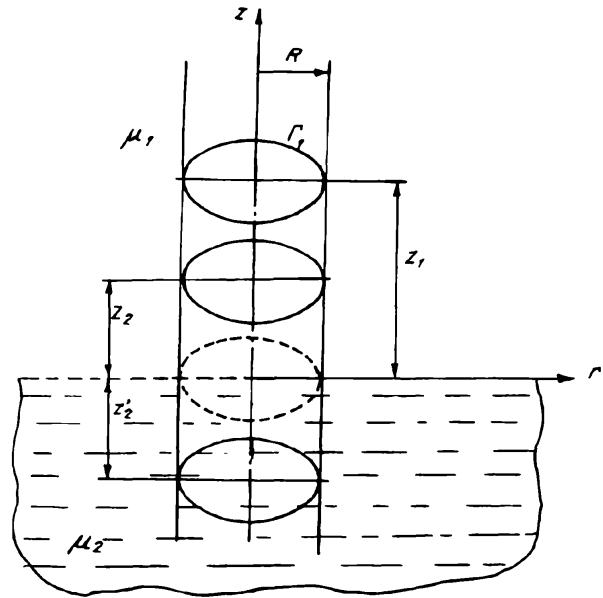


Figura 3.3: Cilindru de analiză a fluxurilor magnetice

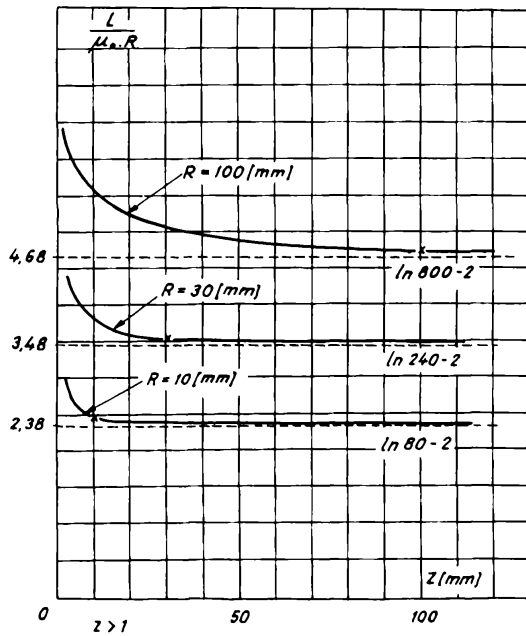


Figura 3.2: Variația mărimii $L/\mu_0 R$ în funcție de distanța z de la planul spirei la planul de separație a celor două medii

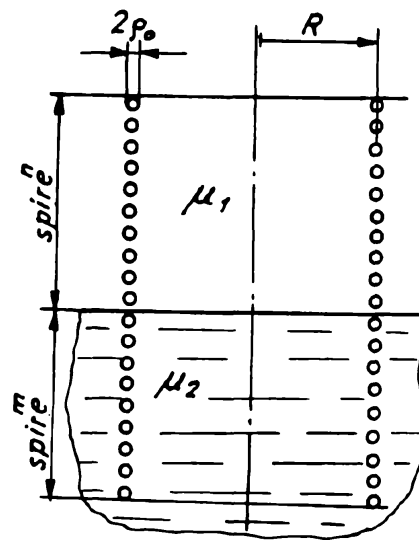


Figura 3.4: Bobină reală cufundată parțial într-o masă de lichid magnetic

$$E(k) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \cdot \sin^2 \beta} \cdot d\beta \quad (3.3)$$

sunt integralele eliptice complete de prima respectiv a II-a speță, în forme trigonometrice normale, de modul $k < 1$,

$$k^2 = \frac{4r_1 r_2}{d^2 + (r_1 + r_2)^2}. \quad (3.4)$$

Când spirele au raze egale $r_1 = r_2 = R$,

$$k^2(d) = \frac{4R^2}{d^2 + 4R^2} \quad (3.5)$$

iar inductanța (3.1) se scrie în forma:

$$L_{1,2}(d) = \mu R \left\{ \frac{2}{k(d)} [F(k(d)) - E(k(d))] - k(d) \cdot F(k(d)) \right\} \quad (3.6)$$

Inductanța proprie L_0 a unei spire de secțiune circulară și rază a conductorului $\rho_0 \ll R$ se obține din (3.1) luând limita egalității ([43]) când $d = 0$ și $r_1 \rightarrow r_2$ ($r_1 = r_2 + \rho_0$)

$$L_0 = \mu R \left(\ln \frac{8R}{\rho_0} - 2 \right) \quad (3.7)$$

Fluxul magnetic propriu prin suprafața S a spirei va fi dat de

$$\Phi_0 = \int_S \vec{B}_0 \cdot d\vec{s} = L_0 i_c \quad (3.8)$$

i_c reprezentând intensitatea curentului prin spirală.

3.2 Calculul inductivității spirei reale în mediu neomogen

În continuare se va stabili expresia inductanței proprii pentru o spirală circulară plană reală, aflată într-un mediu eterogen dar liniar și fără magnetizație permanentă, planul spirei fiind paralel cu suprafața de separație dintre două medii diferite, de permeabilități magnetice μ_1 și respectiv μ_2 (fig. 2.2 dar cu spirală reală).

Într-o primă aproximație, spira reală și imaginea ei pot fi considerate filiforme și procedând ca la capitolul 2 câmpul magnetic determinat de spira parcursă de curent poate fi calculat aplicând metoda imaginilor:

- Câmpul în mediul în care se află spira se presupune generat de spira dată parcursă de i_c împreună cu spira imagine față de planul de separație, parcursă de curentul i' (fig. 2.3), ambele circuite fiind plasate într-un mediu omogen de permeabilitate magnetică μ_1 ;
- Câmpul în mediul cu permeabilitatea μ_2 se presupune determinat de spira inițială, parcursă de curentul i'' și plasată într-un mediu omogen de permeabilitate μ_2 (fig. 2.4);

- Necunoscutele i' și i'' se stabilesc din condițiile de continuitate la suprafața de separație a celor două medii. Se obține:

$$i' = \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2 + \mu_1} \cdot i_c \quad (3.9)$$

$$i'' = \frac{2\mu_1}{\mu_1 + \mu_2} \cdot i_c \quad (3.10)$$

Notând cu z distanța dintre planul spirei și suprafața de separație dintre cele două medii, cu teorema superpoziției, se obține fluxul prin suprafața spirei ca suma dintre fluxurile determinate de curenții i_c și i' :

$$\Phi = \Phi_0 + \Phi_{2,1} = i_c L_0 + i' L_{2,1} \quad (3.11)$$

în care $L_{2,1}$ rezultă din (3.6) cu

$$k^2 = \frac{R^2}{z^2 + R^2} \quad (3.12)$$

Ca urmare inductanța spirei rezultă în forma

$$L = \frac{\Phi}{i_c} = L_0 + R\mu_1 \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2 + \mu_1} \left\{ \frac{2}{k} [F(k) - E(k)] - kF(k) \right\} \quad (3.13)$$

în care s-a ținut seama de egalitatea (3.9).

Punând relația (3.6) sub forma

$$L_{1,2}(z) = \mu_1 \cdot f(z) \quad (3.14)$$

egalitatea obținută poate fi scrisă cum urmează:

$$L(z) = L_0 + \mu_1 \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2 + \mu_1} \cdot f(2z) \quad (3.15)$$

Pentru o ilustrare grafică a variației lui L în funcție de distanța z la suprafața de separație a celor două medii, relația (3.13) este preferabilă sub forma ([45, 46]):

$$L = \mu_0 R \left\{ \mu_{r1} \left(\ln \frac{8R}{\rho_0} - 2 \right) + \mu_{r1} \frac{\mu_{r2} - \mu_{r1}}{\mu_{r2} + \mu_{r1}} \cdot \left[\frac{2}{k} (F(k) - E(k)) - kF(k) \right] \right\} \quad (3.16)$$

Figura 3.2 prezintă variația mărimii $L/\mu_0 R$ funcție de z pentru: $\rho_0 = 1$ mm, $\mu_{r1} = 1$, $\mu_{r2} = 1, 5$ și $R = 10; 30; 100$ mm (Se consideră că spira nu atinge mediul de permeabilitate magnetică relativă μ_{r2} , deci $z > 1$). S-au menționat punctul și asimptotele $\frac{L_0}{\mu_0 R} = \ln \frac{8R}{\rho_0} - 2$.

Se observă că inductanța spirei variază rapid la îndepărtarea ei de suprafața de separație a celor două medii, tinzând spre L_0 , astfel încât la distanța $z=R$ (marcată pe grafic) diferența maximă de inductivitate $L - L_0$ (ce se obține pentru $\mu_{r2} \rightarrow \infty$) este:

$$\Delta L_{z=R} = L_{z=R} - L_0 = 0,113\mu_{r1}R \quad [H] \quad (3.17)$$

Variația rapidă a inductanței în intervalul $z \in (0, R)$ sugerează posibilitatea folosirii acesteia în construcția unor traductoare.

3.3 Cazul mai multor spire în mediu eterogen

Considerăm acum mai multe spire care îndeplinesc condițiile geometrice precizate în subcapitolul 3.2. Folosim notațiile:

$$\bullet \quad [(\Phi_s(d_1, d_2))_\gamma]_\delta = \quad (3.18)$$

=fluxul magnetic prin suprafața unei spire filiforme amplasată în mediul γ , creat de o altă spiră filiformă amplasată în mediul δ , distanța de la spire la suprafața de separație dintre medii fiind d_1 și respectiv d_2 .

$$\bullet \quad [(\Phi_s(d, d))_\delta]_\delta = \quad (3.19)$$

=fluxul propriu al unei spire reale amplasată în mediul δ , la distanța d de suprafața de separație dintre medii.

$$\bullet \quad \Phi(d)_\gamma = \mu_\gamma i_c R \left\{ \frac{2}{k(d)} [F(k(d)) - E(k(d))] - k(d) \cdot F(k(d)) \right\} \quad (3.20)$$

$$\bullet \quad k^2(d) = \frac{4R^2}{d^2 + 4R^2} \quad (3.21)$$

$$\bullet \quad \Phi_{0\gamma} = \Phi(0)_\gamma = \mu_\gamma i_c R \left(\ln \frac{8R}{\rho_0} - 2 \right) = \quad (3.22)$$

=fluxul propriu al spirei reale considerată în mediul omogen γ .

(d , d_1 și d_2 pot lua valori reale atât pozitive cât și negative iar γ și δ pot lua valorile formale 1 sau 2.)

Cu aceste notații fluxul total prin suprafața spirei este:

$$[(\Phi_s(z, z))_1]_1 = \Phi_{01} + \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2 + \mu_1} \Phi(2z)_1 \quad (3.23)$$

Deoarece anterior imaginea spirei reale față de planul de separație dintre medii s-a considerat filiformă, relația (3.23) este valabilă pentru $z \gg \rho_0$. Dacă $0 < z < \rho_0$, valoarea fluxului total prin spiră este aproximată mai bine de relația (3.24), care se obține din relația (3.23) printr-o trecere la limită similară obținerii egalității (3.7).

$$[(\Phi_s(z, z))_1]_1 = \Phi_{01} \left(1 + \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2 + \mu_1} \right) \quad (3.24)$$

Presupunând că spira execută o mișcare de translație pe direcția axei sale, pornind din mediul 1, traversând suprafața de separație dintre medii și ajungând în mediul 2 la distanța $z' = -z$ față de suprafața de separație dintre medii, pe toată această distanță fluxul ei magnetic trebuie să aibă o variație continuă. Altfel spus pentru $z \rightarrow 0$ și $z' \rightarrow 0$ trebuie îndeplinită condiția:

$$\begin{aligned} [(\Phi_s(z, z))_1]_1 &= \Phi_{01} + \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2 + \mu_1} \Phi(2z)_1 = \\ &= \Phi_{02} + \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_2 + \mu_1} \Phi(2z')_2 = [(\Phi_s(z', z'))_2]_2 \end{aligned} \quad (3.25)$$

Se observă că funcția $\Phi(d)_\gamma$ este pară față de variabila d , deci

$$\Phi(d)_\gamma = \Phi(-d)_\gamma \quad (3.26)$$

Condiția de continuitate (3.25) devine

$$\mu_1(a + b) = \mu_2(a - b) \quad (3.27)$$

unde

$$a = \ln \frac{8R}{\rho_0} - 2 \quad (3.28)$$

$$b = \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2 + \mu_1} \left\{ \frac{2}{k(d)} [F(k(d)) - E(k(d))] - k(d) \cdot F(k(d)) \right\} \quad (3.29)$$

Din ecuația (3.27)

$$b = \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2 + \mu_1} \cdot a \quad (3.30)$$

și egalându-l cu b din relația (3.29) obținem condiția de continuitate

$$\ln \frac{8R}{\rho_0} - 2 = \frac{2}{k(2z)} [F(k(2z)) - E(k(2z))] - k(2z) \cdot F(k(2z)) \quad (3.31)$$

Relația (3.31) amplificată cu $\mu_1 i_c R$ este echivalentă cu

$$\Phi_{01} = \Phi(2z)_1 \quad (3.32)$$

și amplificată cu $\mu_2 i_c R$ este echivalentă cu

$$\Phi_{02} = \Phi(2z')_2 \quad (3.33)$$

Ecuațiile (3.32) și (3.33) (aduse la forma (3.31) și rezolvate numeric) oferă valoarea exactă a lui z și respectiv z' până la care este valabilă una sau cealaltă dintre formulele (3.23) și (3.24).

Considerăm cilindrul cu înălțimea neprecizată din figura 3.3 și de rază R egală cu raza spirei și spira Γ_1 la distanța z_1 de suprafața lichidului magnetic.

Conform considerațiilor făcute anterior, fluxul magnetic printr-o secțiune transversală a cilindrului (perpendiculară pe axă), în mediul 1 la distanța $z_2 > 0$ de suprafața lichidului magnetic este

$$[(\Phi_s(z_2, z_1))_1]_1 = \Phi(z_1 - z_2)_1 + \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2 + \mu_1} \Phi(z_1 + z_2)_1 \quad (3.34)$$

Dacă secțiunea este în mediul 2 ($z'_2 < 0$)

$$[(\Phi_s(z'_2, z_1))_2]_1 = \frac{2\mu_1}{\mu_2 + \mu_1} \Phi(z_1 - z'_2)_2 \quad (3.35)$$

Ne imaginăm existența mai multor spire $\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_n$ în mediul 1 la distanțele z_1, z_2, \dots, z_n de suprafața lichidului magnetic. Fluxul creat de toate aceste spire prin Γ_1 este:

$$\begin{aligned} [(\Phi_{\Gamma_1})_1]_1 &= [(\Phi_s(z_1, z_1))_1]_1 + [(\Phi_s(z_1, z_2))_1]_1 + \\ &+ [(\Phi_s(z_1, z_3))_1]_1 + \dots + [(\Phi_s(z_1, z_n))_1]_1 \end{aligned} \quad (3.36)$$

Sintetic, fluxul creat de toate aceste spire prin fiecare dintre ele, este dat de sistemul (3.37):

$$\begin{aligned} [(\Phi_{\Gamma_1})_1]_1 &= \sum_{i=1}^n [(\Phi_s(z_1, z_i))_1]_1 \\ [(\Phi_{\Gamma_2})_1]_1 &= \sum_{i=1}^n [(\Phi_s(z_2, z_i))_1]_1 \\ [(\Phi_{\Gamma_p})_1]_1 &= \sum_{i=1}^n [(\Phi_s(z_p, z_i))_1]_1 \\ [(\Phi_{\Gamma_n})_1]_1 &= \sum_{i=1}^n [(\Phi_s(z_n, z_i))_1]_1 \end{aligned} \quad (3.37)$$

Fiecare din aceste spire creează într-o secțiune Γ' din mediul 2 (aflată la distanța $z' < 0$ de suprafața de separație dintre medii) fluxul

$$[(\Phi_s(z', z_i))_2]_1 = \frac{2\mu_1}{\mu_2 + \mu_1} \Phi(z_i - z')_2 \quad (3.38)$$

Deci fluxul total prin Γ' creat de spirele din mediul 1 este

$$[(\Phi_{\Gamma'})_2]_1 = \sum_{i=1}^n [(\Phi_s(z', z_i))_2]_1 \quad (3.39)$$

Procedând în mod analog, pentru o spiră plasată în mediul 2 la distanța $z' < 0$ față de suprafața de separație dintre medii, avem:

$$[(\Phi_s(z', z'))_2]_2 = \Phi_{02} + \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_2 + \mu_1} \Phi(2z')_2 \quad (3.40)$$

sau

$$[(\Phi_s(z', z'))_2]_2 = \Phi_{02} \left(1 + \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_2 + \mu_1}\right) \quad (3.41)$$

Fluxul magnetic, creat de o spiră plasată la distanța $z'_1 < 0$ de suprafața lichidului magnetic, printr-o secțiune transversală a cilindrului, în mediul 2 la distanța $z'_2 < 0$ de suprafața lichidului magnetic este

$$[(\Phi_s(z'_2, z'_1))_2]_2 = \Phi(z'_1 - z'_2)_2 + \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_2 + \mu_1} \Phi(z'_1 + z'_2)_2 \quad (3.42)$$

Iar dacă secțiunea este în mediul 1 ($z_2 > 0$)

$$[(\Phi_s(z_2, z'_1))_1]_2 = \frac{2\mu_2}{\mu_2 + \mu_1} \Phi(z'_1 - z_2)_1 \quad (3.43)$$

Ne imaginăm existența mai multor spire $\Gamma'_1, \Gamma'_2, \dots, \Gamma'_m$ în mediul 2 la distanțele z'_1, z'_2, \dots, z'_m de suprafața lichidului magnetic. Fluxul creat de toate aceste spire prin Γ'_1 este:

$$\begin{aligned} [(\Phi_{\Gamma'_1})_2]_2 &= [(\Phi_s(z'_1, z'_1))_2]_2 + [(\Phi_s(z'_1, z'_2))_2]_2 + \\ &+ [(\Phi_s(z'_1, z'_3))_2]_2 + \dots + [(\Phi_s(z'_1, z'_m))_2]_2 \end{aligned} \quad (3.44)$$

Sintetic, fluxul creat de toate aceste spire prin fiecare dintre ele, este dat de sistemul (3.45):

$$\begin{aligned}
[(\Phi_{\Gamma'_1})_2]_2 &= \sum_{j=1}^m [(\Phi_s(z'_1, z'_j))_2]_2 \\
[(\Phi_{\Gamma'_2})_2]_2 &= \sum_{j=1}^m [(\Phi_s(z'_2, z'_j))_2]_2 \\
[(\Phi_{\Gamma'_q})_2]_2 &= \sum_{j=1}^m [(\Phi_s(z'_q, z'_j))_2]_2 \\
[(\Phi_{\Gamma'_m})_2]_2 &= \sum_{j=1}^m [(\Phi_s(z'_m, z'_j))_2]_2
\end{aligned} \tag{3.45}$$

Fiecare din aceste spire creează într-o secțiune Γ din mediul 1 (aflată la distanța $z > 0$ de suprafața de separație dintre medii) fluxul

$$[(\Phi_s(z, z'_j))_1]_2 = \frac{2\mu_2}{\mu_2 + \mu_1} \Phi(z'_j - z)_1 \tag{3.46}$$

Deci fluxul total prin Γ creat de spirele din mediul 2 este

$$[(\Phi_{\Gamma})_1]_2 = \sum_{j=1}^m [(\Phi_s(z, z'_j))_1]_2 \tag{3.47}$$

Cu cele de mai sus putem exprima fluxul total prin fiecare spiră a bobinei, creat atât de spirele din mediul 1 cât și de cele din mediul 2.

$$\begin{aligned}
[(\Phi_{\Gamma_1})_1]_{1+2} &= \sum_{i=1}^n [(\Phi_s(z_1, z_i))_1]_1 + \sum_{j=1}^m [(\Phi_s(z_1, z'_j))_1]_2 \\
[(\Phi_{\Gamma_2})_1]_{1+2} &= \sum_{i=1}^n [(\Phi_s(z_2, z_i))_1]_1 + \sum_{j=1}^m [(\Phi_s(z_2, z'_j))_1]_2 \\
[(\Phi_{\Gamma_p})_1]_{1+2} &= \sum_{i=1}^n [(\Phi_s(z_p, z_i))_1]_1 + \sum_{j=1}^m [(\Phi_s(z_p, z'_j))_1]_2 \\
[(\Phi_{\Gamma_n})_1]_{1+2} &= \sum_{i=1}^n [(\Phi_s(z_n, z_i))_1]_1 + \sum_{j=1}^m [(\Phi_s(z_n, z'_j))_1]_2
\end{aligned} \tag{3.48}$$

$$\begin{aligned}
[(\Phi_{\Gamma'_1})_2]_{1+2} &= \sum_{j=1}^m [(\Phi_s(z'_1, z'_j))_2]_2 + \sum_{i=1}^n [(\Phi_s(z'_1, z_i))_2]_1 \\
[(\Phi_{\Gamma'_2})_2]_{1+2} &= \sum_{j=1}^m [(\Phi_s(z'_2, z'_j))_2]_2 + \sum_{i=1}^n [(\Phi_s(z'_2, z_i))_2]_1
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
[(\Phi_{\Gamma'_q})_2]_{1+2} &= \sum_{j=1}^m [(\Phi_s(z'_q, z'_j))_2]_2 + \sum_{i=1}^n [(\Phi_s(z'_q, z_i))_2]_1 \\
[(\Phi_{\Gamma'_m})_2]_{1+2} &= \sum_{j=1}^m [(\Phi_s(z'_m, z'_j))_2]_2 + \sum_{i=1}^n [(\Phi_s(z'_m, z_i))_2]_1
\end{aligned} \tag{3.49}$$

Deci termenul general pentru fluxul din spira p din mediul 1 și respectiv prin spira q din mediul 2 este:

$$[(\Phi_{\Gamma_p})_1]_{1+2} = \sum_{i=1}^n [(\Phi_s(z_p, z_i))_1]_1 + \sum_{j=1}^m [(\Phi_s(z_p, z'_j))_1]_2 \tag{3.50}$$

$$[(\Phi_{\Gamma'_q})_2]_{1+2} = \sum_{j=1}^m [(\Phi_s(z'_q, z'_j))_2]_2 + \sum_{i=1}^n [(\Phi_s(z'_q, z_i))_2]_1 \tag{3.51}$$

De regulă bobinajul este executat uniform și dacă notăm cu 2ρ distanța dintre spire există relațiile:

$$z_i - z_{i-1} = 2\rho \quad \text{pentru} \quad i = 1 \dots n \tag{3.52}$$

$$z'_j - z'_{j-1} = -2\rho \quad \text{pentru} \quad j = 1 \dots m \tag{3.53}$$

În baza celor explicate în egalitățile (3.23) ... (3.33), pentru studiul evoluției induc-tanței bobinei funcție de nivelul lichidului magnetic, se pot analiza pozițiile succesive ale lichidului magnetic astfel încât suprafața de separație dintre lichid și aer să fie la egală distanță de prima spiră din aer și de prima spiră din lichidul magnetic. În acest caz dacă bobinajul este executat uniform cu pasul 2ρ sunt valabile și egalitățile:

$$z_i = \rho(2i - 1) \quad \text{pentru} \quad i = 1 \dots n \tag{3.54}$$

$$z'_j = -\rho(2j - 1) \quad \text{pentru} \quad j = 1 \dots m \tag{3.55}$$

Prin analogie cu (3.34) și respectiv (3.43), fluxul magnetic creat de spira i din mediul 1 și de spira j din mediul 2, prin secțiunea spirei p din mediul 1 este:

$$[(\Phi_s(z_p, z_i))_1]_1 = \Phi(z_i - z_p)_1 + \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2 + \mu_1} \Phi(z_i + z_p)_1 \tag{3.56}$$

$$[(\Phi_s(z_p, z'_j))_1]_2 = \frac{2\mu_2}{\mu_2 + \mu_1} \Phi(z'_j - z_p)_1 \tag{3.57}$$

Cu (3.56) și (3.57) fluxul total prin spira p din mediul 1 (relația (3.50)) devine

$$\begin{aligned}
[(\Phi_{\Gamma_p})_1]_{1+2} &= \sum_{i=1}^n [\Phi(z_i - z_p)_1 + \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2 + \mu_1} \Phi(z_i + z_p)_1] + \\
&+ \sum_{j=1}^m \frac{2\mu_2}{\mu_2 + \mu_1} \Phi(z'_j - z_p)_1
\end{aligned} \tag{3.58}$$

Tabelul 1. Valorile variabilei (i-p)

	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	...	i=n
p=1	0	1	2	3	4	...	n-1
p=2	-1	0	1	2	3		n-2
p=3	-2	-1	0	1	2		n-3
p=4	-3	-2	-1	0	1		n-4
p=5	-4	-3	-2	-1	0		n-5
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮		⋮
p=n	-(n-1)	-(n-2)	-(n-3)	-(n-4)	-(n-5)	...	0

iar dacă ținem cont de relațiile (3.54), (3.55) și de paritatea funcției Φ , atunci:

$$\begin{aligned} |z_i - z_p| &= 2\rho(i - p) \\ |z_i + z_p| &= 2\rho(i + p - 1) \\ |z'_j - z_p| &= 2\rho(j + p - 1) \end{aligned}$$

și

$$\begin{aligned} [(\Phi_{\Gamma_p})_1]_{1+2} &= \sum_{i=1}^n [\Phi(2\rho(i - p))]_1 + \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2 + \mu_1} \cdot \\ &\cdot \sum_{i=1}^n \Phi[2\rho(i + p - 1)]_1 + \frac{2\mu_2}{\mu_2 + \mu_1} \sum_{j=1}^m \Phi[2\rho(j + p - 1)]_1 \end{aligned} \quad (3.59)$$

Fluxul total ce înlănțuie spirele din mediul 1 este

$$\begin{aligned} [(\Phi)_1]_{1+2} &= \sum_{p=1}^n [(\Phi_{\Gamma_p})_1]_{1+2} = \sum_{p=1}^n \sum_{i=1}^n [\Phi(2\rho(i - p))]_1 + \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2 + \mu_1} \cdot \\ &\cdot \sum_{p=1}^n \sum_{i=1}^n \Phi[2\rho(i + p - 1)]_1 + \frac{2\mu_2}{\mu_2 + \mu_1} \sum_{p=1}^n \sum_{j=1}^m \Phi[2\rho(j + p - 1)]_1 \end{aligned} \quad (3.60)$$

Valorile variabilei (i-p) din prima sumă dublă a relației (3.60), pentru $i=(1 \dots n)$ și $p=(1 \dots n)$ sunt prezentate în tabelul 1

Însumând funcțiile corespunzătoare elementelor de pe toate diagonalele începând din stânga sus spre dreapta jos și ținând cont de paritatea funcției Φ , obținem echivalența:

$$\sum_{p=1}^n \sum_{i=1}^n [\Phi(2\rho(i - p))]_1 = n\Phi_{01} + 2 \sum_{t=1}^{n-1} (n - t)\Phi(2\rho t)_1 \quad (3.61)$$

Valorile variabilei (i+p-1) din a II-a sumă dublă a relației (3.60), pentru $i=(1 \dots n)$ și $p=(1 \dots n)$ sunt prezentate în tabelul 2

Însumând funcțiile corespunzătoare elementelor de pe toate diagonalele începând din stânga jos spre dreapta sus, obținem echivalența:

$$\begin{aligned} \sum_{p=1}^n \sum_{i=1}^n [\Phi(2\rho(i + p - 1))]_1 &= \sum_{t=1}^n t\Phi(2\rho t)_1 + \\ &+ \sum_{t=n+1}^{2n-1} (2n - t)\Phi(2\rho t)_1 \end{aligned} \quad (3.62)$$

Tabelul 2. Valorile variabilei (i+p-1)

	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	...	i=n
p=1	1	2	3	4	5	...	n
p=2	2	3	4	5	6		n+1
p=3	3	4	5	6	7		n+2
p=4	4	5	6	7	8		n+3
p=5	5	6	7	8	9		n+4
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮		⋮
p=n	n	(n+1)	(n+2)	(n+3)	(n+4)	...	(2n-1)

Tabelul 3. Valorile variabilei (j+p-1)

	j=1	j=2	j=3	j=4	j=5	...	j=m
p=1	1	2	3	4	5	...	m
p=2	2	3	4	5	6		m+1
p=3	3	4	5	6	7		m+2
p=4	4	5	6	7	8		m+3
p=5	5	6	7	8	9		m+4
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮		⋮
p=n	n	(n+1)	(n+2)	(n+3)	(n+4)	...	(n+m-1)

Valorile variabilei (j+p-1) din ultima sumă dublă a relației (3.60), pentru j=(1 ... m) și p=(1 ... n) sunt prezentate în tabelul 3

Însumând funcțiile corespunzătoare elementelor de pe toate diagonalele începând din stânga jos spre dreapta sus , obținem echivalența:

$$\begin{aligned}
 \sum_{p=1}^n \sum_{j=1}^m [\Phi(2\rho(j+p-1))]_1 &= \sum_{t=1}^{\min(m,n)} t\Phi(2\rho t)_1 + \\
 &+ \sum_{t=\min(m,n)+1}^{\max(m,n)} \min(m,n)\Phi(2\rho t)_1 + \sum_{t=\max(m,n)+1}^{m+n-1} (m+n-t)\Phi(2\rho t)_1
 \end{aligned} \quad (3.63)$$

unde:

$$\min(m,n) = \begin{cases} m & \text{pentru } m \leq n \\ n & \text{pentru } m \geq n \end{cases} \quad (3.64)$$

$$\max(m,n) = \begin{cases} m & \text{pentru } m \geq n \\ n & \text{pentru } m \leq n \end{cases} \quad (3.65)$$

Folosind echivalențele (3.61) ... (3.63), fluxul total ce înlănțuie spirele din mediul 1 este

$$[(\Phi)_1]_{1+2} = n\Phi_{01} + 2 \sum_{t=1}^{n-1} (n-t)\Phi(2\rho t)_1 +$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2 + \mu_1} \left(\sum_{t=1}^n t \Phi(2\rho t)_1 + \sum_{t=n+1}^{2n-1} (2n-t) \Phi(2\rho t)_1 \right) + \\
& + \frac{2\mu_2}{\mu_2 + \mu_1} \left(\sum_{t=1}^{\min(m,n)} t \Phi(2\rho t)_1 + \right. \\
& \left. + \sum_{t=\min(m,n)+1}^{\max(m,n)} \min(m,n) \Phi(2\rho t)_1 + \sum_{t=\max(m,n)+1}^{m+n-1} (m+n-t) \Phi(2\rho t)_1 \right) \quad (3.66)
\end{aligned}$$

Prin analogie cu (3.42) și respectiv (3.35), fluxul magnetic creat de spira j din mediul 2 și de spira i din mediul 1, prin secțiunea spirei q din mediul 2 este:

$$[(\Phi_s(z'_q, z'_j))_2]_2 = \Phi(z'_j - z'_q)_2 + \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_2 + \mu_1} \Phi(z'_j + z'_q)_2 \quad (3.67)$$

$$[(\Phi_s(z'_q, z_i))_2]_1 = \frac{2\mu_1}{\mu_2 + \mu_1} \Phi(z_i - z'_q)_2 \quad (3.68)$$

Cu (3.67) și (3.68) fluxul total prin spira q din mediul 2 (relația (3.51)) devine

$$\begin{aligned}
[(\Phi_{\Gamma'_q})_2]_{1+2} &= \sum_{j=1}^m [\Phi(z'_j - z'_q)_2 + \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_2 + \mu_1} \Phi(z'_j + z'_q)_2] + \\
&+ \sum_{i=1}^n \frac{2\mu_1}{\mu_2 + \mu_1} \Phi(z_i - z'_q)_2 \quad (3.69)
\end{aligned}$$

iar dacă ținem cont de relațiile (3.54), (3.55) și de paritatea funcției Φ , atunci

$$\begin{aligned}
|z'_j - z'_q| &= 2\rho(j - q) \\
|z'_j + z'_q| &= 2\rho(j + q - 1) \\
|z_i - z'_q| &= 2\rho(i + q - 1)
\end{aligned}$$

și

$$\begin{aligned}
[(\Phi_{\Gamma'_q})_2]_{1+2} &= \sum_{j=1}^m [\Phi(2\rho(j - q))_2 + \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_2 + \mu_1} \cdot \\
&\cdot \sum_{j=1}^m \Phi[2\rho(j + q - 1)]_2 + \frac{2\mu_1}{\mu_2 + \mu_1} \sum_{i=1}^n \Phi[2\rho(i + q - 1)]_2 \quad (3.70)
\end{aligned}$$

Fluxul total ce înlănțuie spirele din mediul 2 este

$$\begin{aligned}
[(\Phi)_2]_{1+2} &= \sum_{q=1}^m [(\Phi_{\Gamma'_q})_2]_{1+2} = \sum_{q=1}^m \sum_{j=1}^m [\Phi(2\rho(j - q))_2 + \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_2 + \mu_1} \cdot \\
&\cdot \sum_{j=1}^m \sum_{j=1}^m \Phi[2\rho(j + q - 1)]_2 + \frac{2\mu_1}{\mu_2 + \mu_1} \sum_{q=1}^m \sum_{i=1}^n \Phi[2\rho(i + q - 1)]_2 \quad (3.71)
\end{aligned}$$

Valorile variabilei (j-q) din prima sumă dublă a relației (3.71), pentru j=(1 ... m) și q=(1 ... m) sunt prezentate în tabelul 4.

Tabelul 4. Valorile variabilei (j-q)

	j=1	j=2	j=3	j=4	j=5	...	j=m
q=1	0	1	2	3	4	...	m-1
q=2	-1	0	1	2	3		m-2
q=3	-2	-1	0	1	2		m-3
q=4	-3	-2	-1	0	1		m-4
q=5	-4	-3	-2	-1	0		m-5
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮		⋮
q=m	-(m-1)	-(m-2)	-(m-3)	-(m-4)	-(m-5)	...	0

Tabelul 5. Valorile variabilei (j+q-1)

	j=1	j=2	j=3	j=4	j=5	...	j=m
q=1	1	2	3	4	5	...	m
q=2	2	3	4	5	6		m+1
q=3	3	4	5	6	7		m+2
q=4	4	5	6	7	8		m+3
q=5	5	6	7	8	9		m+4
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮		⋮
q=m	m	(m+1)	(m+2)	(m+3)	(m+4)	...	(2m-1)

Însumând funcțiile corespunzătoare elementelor de pe toate diagonalele începând din stânga sus spre dreapta jos și ținând cont de paritatea funcției Φ , obținem echivalența:

$$\sum_{q=1}^m \sum_{j=1}^m [\Phi(2\rho(j-q))_2] = m\Phi_{02} + 2 \sum_{t=1}^{m-1} (m-t)\Phi(2\rho t)_2 \quad (3.72)$$

Valorile variabilei (j+q-1) din a II-a sumă dublă a relației (3.71), pentru j=(1 ... m) și q=(1 ... m) sunt prezentate în tabelul 5

Însumând funcțiile corespunzătoare elementelor de pe toate diagonalele începând din stânga jos spre dreapta sus, obținem echivalența:

$$\begin{aligned} \sum_{q=1}^m \sum_{j=1}^m [\Phi(2\rho(j+q-1))_2] &= \sum_{t=1}^m t\Phi(2\rho t)_2 + \\ &+ \sum_{t=m+1}^{2m-1} (2m-t)\Phi(2\rho t)_2 \end{aligned} \quad (3.73)$$

Valorile variabilei (i+q-1) din ultima sumă dublă a relației (3.71), pentru i=(1 ... n) și q=(1 ... m) sunt prezentate în tabelul 6

Însumând funcțiile corespunzătoare elementelor de pe toate diagonalele începând din stânga jos spre dreapta sus, obținem echivalența:

$$\sum_{q=1}^m \sum_{i=1}^n [\Phi(2\rho(i+q-1))_2] = \sum_{t=1}^{\min(m,n)} t\Phi(2\rho t)_2 +$$

Tabelul 6. Valorile variabilei (i+q-1)

	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	...	i=n
q=1	1	2	3	4	5	...	n
q=2	2	3	4	5	6		n+1
q=3	3	4	5	6	7		n+2
q=4	4	5	6	7	8		n+3
q=5	5	6	7	8	9		n+4
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮		⋮
q=m	m	(m+1)	(m+2)	(m+3)	(m+4)	...	(n+m-1)

$$+ \sum_{t=\min(m,n)+1}^{\max(m,n)} \min(m,n) \Phi(2\rho t)_2 + \sum_{t=\max(m,n)+1}^{m+n-1} (m+n-t) \Phi(2\rho t)_2 \quad (3.74)$$

Folosind echivalențele (3.72) ... (3.74), fluxul total ce înlănțuie spirele din mediul 2 este

$$\begin{aligned} [(\Phi)_2]_{1+2} &= m\Phi_{02} + 2 \sum_{t=1}^{m-1} (m-t) \Phi(2\rho t)_2 + \\ &+ \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_2 + \mu_1} \left(\sum_{t=1}^m t \Phi(2\rho t)_2 + \sum_{t=m+1}^{2m-1} (2m-t) \Phi(2\rho t)_2 \right) + \\ &+ \frac{2\mu_1}{\mu_2 + \mu_1} \left(\sum_{t=1}^{\min(m,n)} t \Phi(2\rho t)_2 + \right. \\ &\left. + \sum_{t=\min(m,n)+1}^{\max(m,n)} \min(m,n) \Phi(2\rho t)_2 + \sum_{t=\max(m,n)+1}^{m+n-1} (m+n-t) \Phi(2\rho t)_2 \right) \end{aligned} \quad (3.75)$$

Deci fluxul total prin spirele bobinei atât în mediul 1 cât și în mediul 2 este dat de

$$\begin{aligned} [(\Phi)_{1+2}]_{1+2} &= n\Phi_{01} + 2 \sum_{t=1}^{n-1} (n-t) \Phi(2\rho t)_1 + \\ &+ \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2 + \mu_1} \left(\sum_{t=1}^n t \Phi(2\rho t)_1 + \sum_{t=n+1}^{2n-1} (2n-t) \Phi(2\rho t)_1 \right) + \\ &+ \frac{2\mu_2}{\mu_2 + \mu_1} \left(\sum_{t=1}^{\min(m,n)} t \Phi(2\rho t)_1 + \right. \\ &\left. + \sum_{t=\min(m,n)+1}^{\max(m,n)} \min(m,n) \Phi(2\rho t)_1 + \sum_{t=\max(m,n)+1}^{m+n-1} (m+n-t) \Phi(2\rho t)_1 \right) + \\ &+ m\Phi_{02} + 2 \sum_{t=1}^{m-1} (m-t) \Phi(2\rho t)_2 + \\ &+ \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_2 + \mu_1} \left(\sum_{t=1}^m t \Phi(2\rho t)_2 + \sum_{t=m+1}^{2m-1} (2m-t) \Phi(2\rho t)_2 \right) + \\ &+ \frac{2\mu_1}{\mu_2 + \mu_1} \left(\sum_{t=1}^{\min(m,n)} t \Phi(2\rho t)_2 + \right. \end{aligned}$$

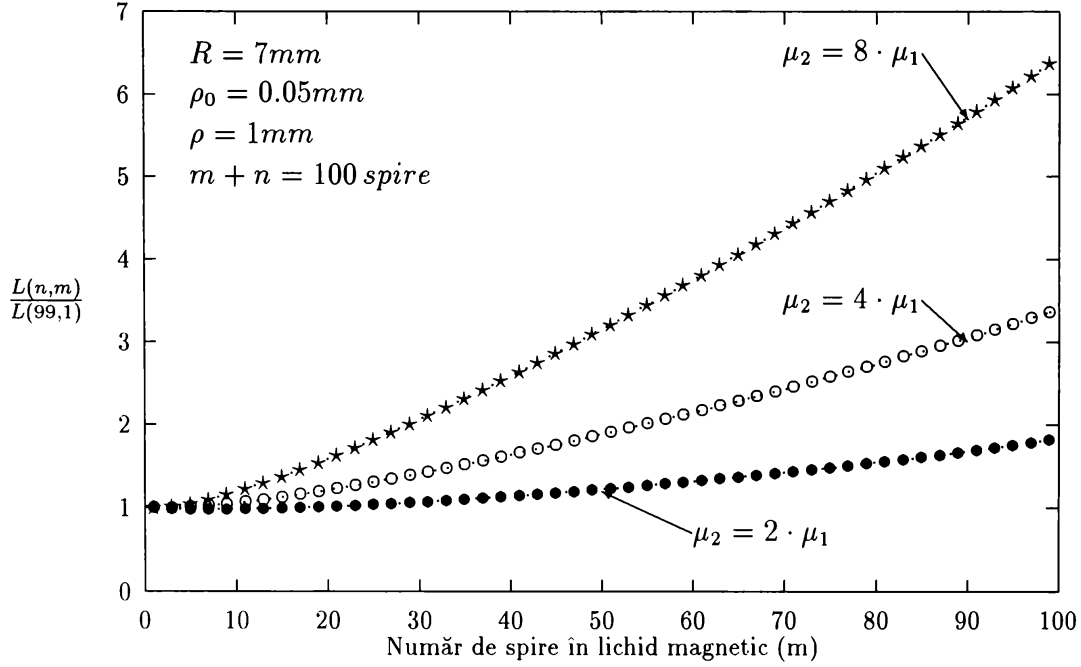


Figura 3.5: Variația relativă a inductanței bobinei pentru 3 tipuri diferite de lichide magnetice

$$+ \sum_{t=\min(m,n)+1}^{\max(m,n)} \min(m,n) \Phi(2\rho t)_2 + \sum_{t=\max(m,n)+1}^{m+n-1} (m+n-t) \Phi(2\rho t)_2 \quad (3.76)$$

Dacă în locul funcțiilor $\Phi(d)_\gamma$ și $\Phi_{0\gamma}$ din relațiile (20) și respectiv (22), se utilizează funcțiile:

- $$\Psi(d) = \frac{\Phi(d)_\gamma}{\mu_\gamma \dot{i}_c} = R \left\{ \frac{2}{k(d)} [F(k(d)) - E(k(d))] - k(d) \cdot F(k(d)) \right\} \quad (3.77)$$

- $$\Psi_0 = \Phi_{0\gamma} = \frac{\Phi(0)_\gamma}{\mu_\gamma \dot{i}_c} = R \left(\ln \frac{8R}{\rho_0} - 2 \right) \quad (3.78)$$

atunci inductanța bobinei din figura 3.4

$$L(n, m) = \frac{[(\Phi)_{1+2}]_{1+2}}{\dot{i}_c} \quad (3.79)$$

ajunge la forma finală

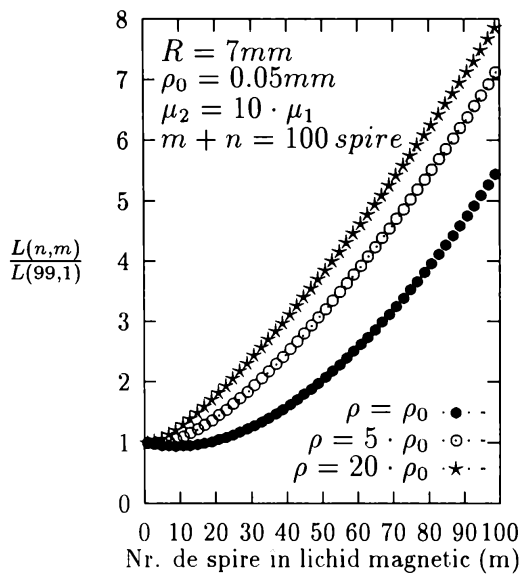


Figura 3.6: Variația relativă a inductanței bobinei pentru 3 valori diferite ale lui ρ

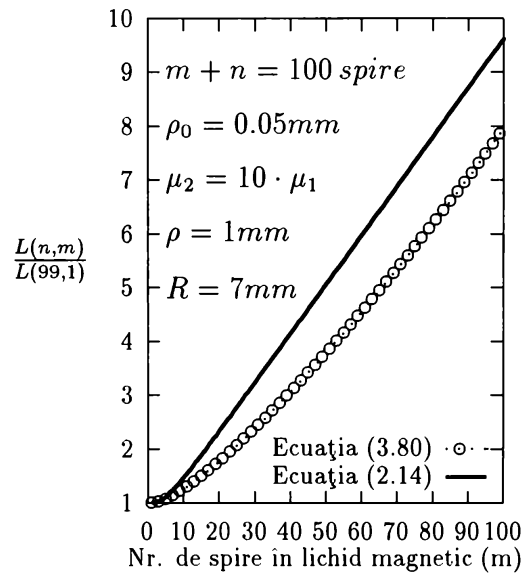


Figura 3.8: Variația relativă a inductanței bobinei calculată prin două metode diferite ($\rho = 20 \cdot \rho_0$, 100 spire)

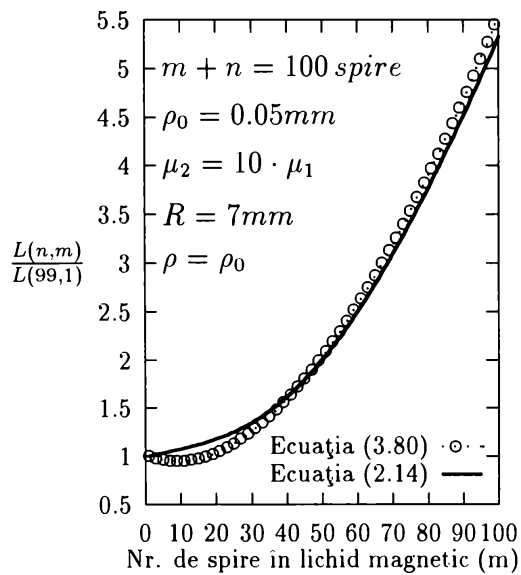


Figura 3.7: Variația relativă a inductanței bobinei calculată prin două metode diferite ($\rho = \rho_0$, 100 spire)

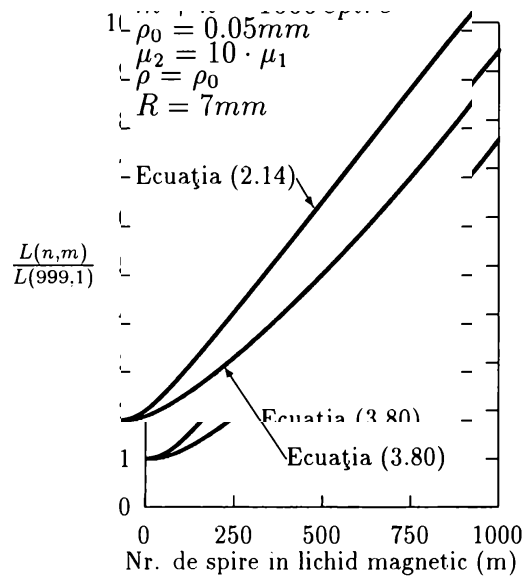


Figura 3.9: Variația relativă a inductanței bobinei calculată prin două metode diferite ($\rho = \rho_0$, 1000 spire)

$$\begin{aligned}
L(n, m) = & n\mu_1\Psi_0 + m\mu_2\Psi_0 + 2\left(\mu_1 \sum_{t=1}^{n-1} (n-t)\Psi(2\rho t) + \right. \\
& \left. + \mu_2 \sum_{t=1}^{m-1} (m-t)\Psi(2\rho t)\right) + \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2 + \mu_1} \left(\mu_1 \sum_{t=1}^n t\Psi(2\rho t) - \right. \\
& \left. - \mu_2 \sum_{t=1}^m t\Psi(2\rho t) + \mu_1 \sum_{t=n+1}^{2n-1} (2n-t)\Psi(2\rho t) - \right. \\
& \left. - \mu_2 \sum_{t=m+1}^{2m-1} (2m-t)\Psi(2\rho t)\right) + 2\mu_1\mu_2 \left(\sum_{t=1}^{\min(m,n)} t\Psi(2\rho t) + \right. \\
& \left. + \sum_{t=\min(m,n)+1}^{\max(m,n)} \min(m,n)\Psi(2\rho t) + \sum_{t=\max(m,n)+1}^{m+n-1} (m+n-t)\Psi(2\rho t)\right) \quad (3.80)
\end{aligned}$$

unde dacă bobinajul este executat spiră lângă spiră

$$\rho = \rho_0 \quad (3.81)$$

În figura 3.5 se prezintă grafic variația relativă a inductanței bobinei din figura 3.4 calculată pe baza ecuației (3.80) pentru 3 tipuri diferite de lichid magnetic ([47]).

Figura 3.6 prezintă grafic variația relativă a inductanței bobinei din figura 3.4 calculată pe baza ecuației (3.80) pentru 3 valori diferite ale lui ρ . Forma curbei pentru $\rho = \rho_0$ din figura 3.6, sugerează utilizarea ecuației (3.80) pentru calculul bobinelor cu $\rho \gg \rho_0$.

Figurile 3.7, 3.8 și 3.9 prezintă simultan, pentru aceeași bobină cufundată în lichid magnetic, variația relativă a inductanței, calculată cu ecuațiile (3.80) și respectiv (2.14).

Abaterea de la situația reală admisă pentru obținerea ecuației (2.14) (aceeași inducție magnetică în fiecare punct din planul spirei, și, spirele considerate filiforme în toate situațiile) este mai mare decât abaterea de la situația reală admisă pentru obținerea ecuației (3.80). Ca urmare a acestui fapt abaterea de la liniaritate a variației relative de inductivitate calculată cu ecuația (2.14) este mai mică decât cea calculată cu ecuația (3.80) (pentru o aceeași bobină). Acest lucru este vizibil în special în figurile 3.8 și 3.9.

3.4 Concluzii

În acest capitol se consideră spirele bobinei reale (conductorul are dimensiuni fizice precizate) când li se calculează propriul flux și filiforme când se calculează contribuția lor la fluxul prin suprafața celorlalte spire ale bobinei.

Formula (3.80) este o sumă finită de integrale eliptice complete de speța I și II și de modul variabil mai mic decât 1. În consecință valoarea inductanței $L(n, m)$ dată de (3.80) este o valoare finită funcție de adâncimea de cufundare a bobinei în lichid magnetic.

Spre deosebire de formula (2.14) care ține cont numai de lungimea și diametrul bobinei și de numărul de spire, formula (3.80) ține cont și de diametrul conductorului. În ce privește dimensionarea traductoarelor inductive cu lichid magnetic este preferabilă utilizarea formulei (3.80) în locul formulei (2.14) din cauza aproximațiilor mai apropiate de realitate admise în deducerea ei.

4

Calculul analitic al inductanțelor bobinelor traductoarelor inductive cu lichid magnetic folosind inducția magnetică pe întreaga suprafață a spirelor și considerând spirele filiforme

4.1 Posibilități de calcul analitic

Dificultatea majoră în calculul inductanței unei bobine filiforme (bobină cu diametrul conductorului egal cu zero) după procedeul dezvoltat anterior constă în faptul că fluxul vectorului inducție magnetică prin orice suprafață delimitată de conturul unei spire filiforme este infinit și deci și valoarea inductanței spirei rezultă infinită.

Deși bobinele filiforme nu există în realitate, în cazul în care raportul dintre diametrul secțiunii transversale a unei bobine circulare și diametrul conductorului este foarte mare, în calcule ar fi preferabilă neglijarea dimensiunii conductorului, ajungându-se astfel la un model teoretic reprezentat printr-o bobină filiformă.

S-a arătat în [48, 49] că factorul de calitate al bobinelor traductoarelor inductive diferențiale cu lichid magnetic, nu prezintă importanță deosebită în ce privește performanțele traductoarelor și deci în cazul bobinei din figura 4.1 este preferabilă o dimensiune a conductorului cât mai redusă, ceea ce justifică modelul teoretic de bobină filiformă.

Dar, pentru proiectarea traductorului și a sistemului electronic de măsură ([48]), este necesară cunoașterea inductanței acestei bobine funcție de nivelul lichidului magnetic din interiorul său.

Este evident faptul că un calcul al inductivității bobinei din figura 4.1, care să țină cont de toți parametrii marcați pe figură, se poate face numai prin metode numerice de simulare a câmpului lor magnetic ([50, 51]). Totuși anumite informații se pot obține mai repede dispunând de relații analitice care să exprime cu aproximație inductanța unei astfel de bobine.

Admițând prezența lichidului magnetic și în exteriorul bobinei, precum și absența

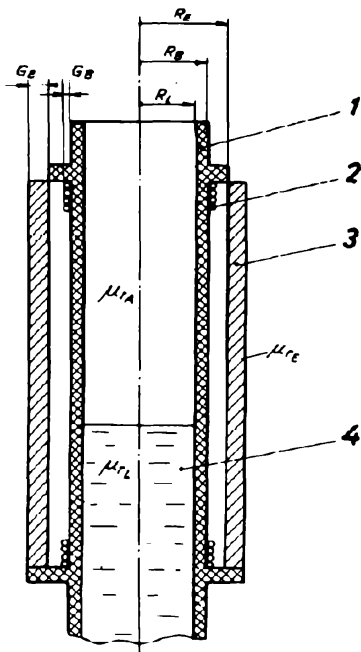


Figura 4.1: Construcția reală a bobinelor unor traductoare cu lichid magnetic

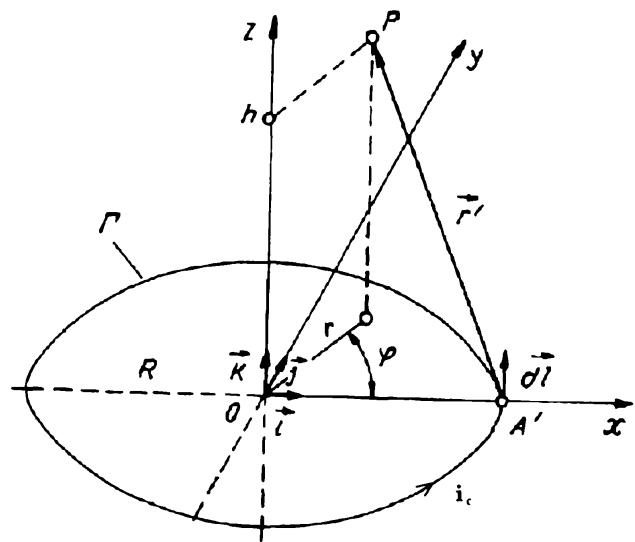


Figura 4.3: Cercul Γ în planul xOy și punctul P exterior planului xOy .

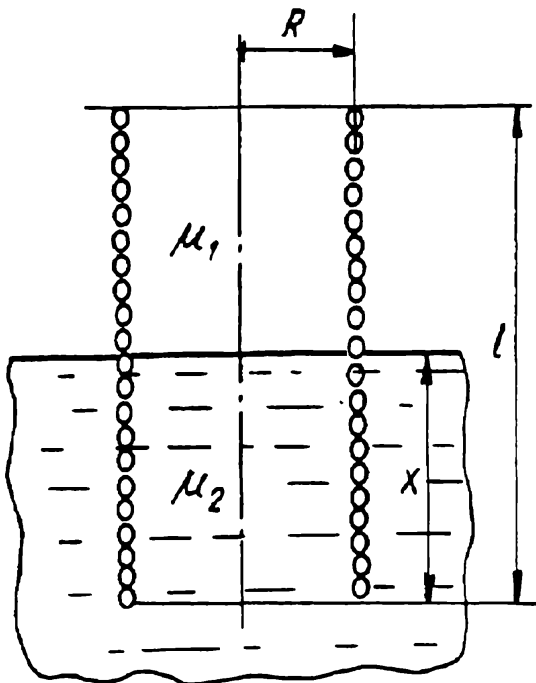


Figura 4.2: Bobină electrică cufundată parțial într-o masă infinită de lichid magnetic.

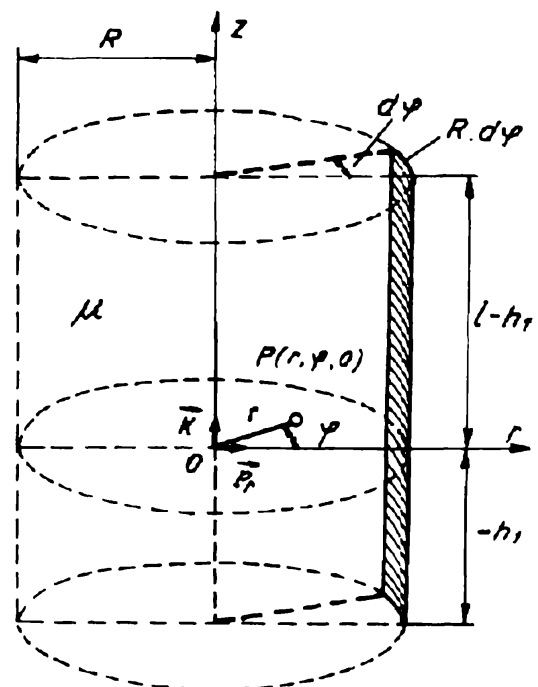


Figura 4.4: Element de bobină de secțiune circulară și punctul $P(r, \varphi, 0)$.

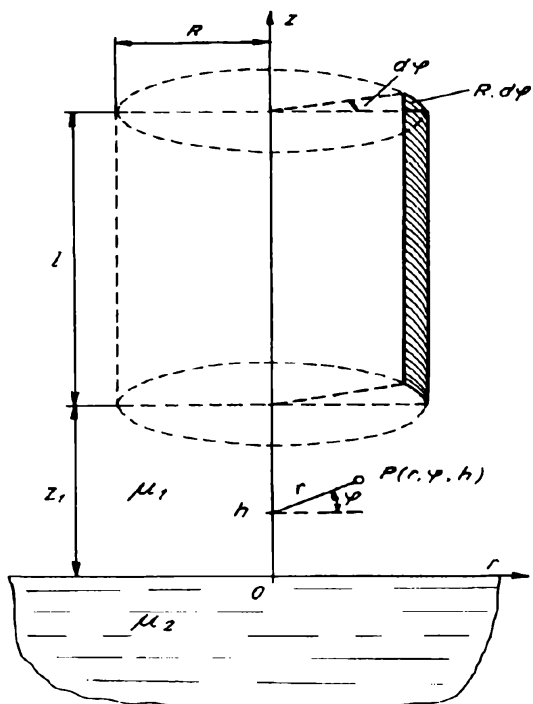


Figura 4.5: Element de bobină și un punct oarecare în prezența lichidului magnetic (mediul μ_2).

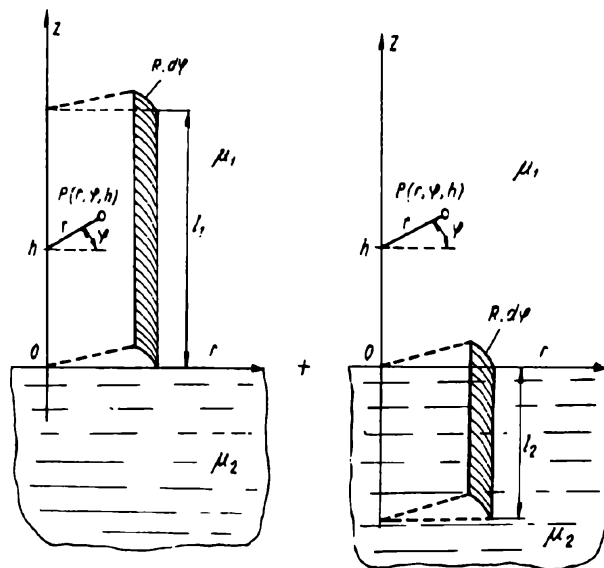


Figura 4.7: Situația din figura 4.6 descompusă cu teorema superpoziției

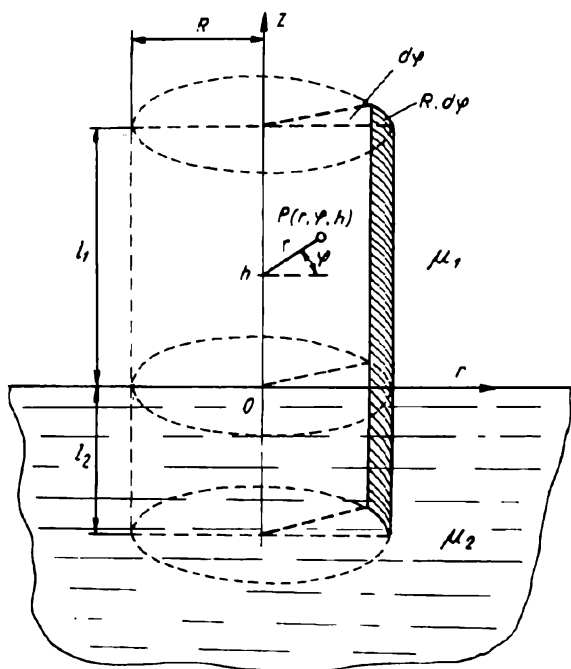


Figura 4.6: Element de bobină cufundat parțial în lichid magnetic (μ_2)

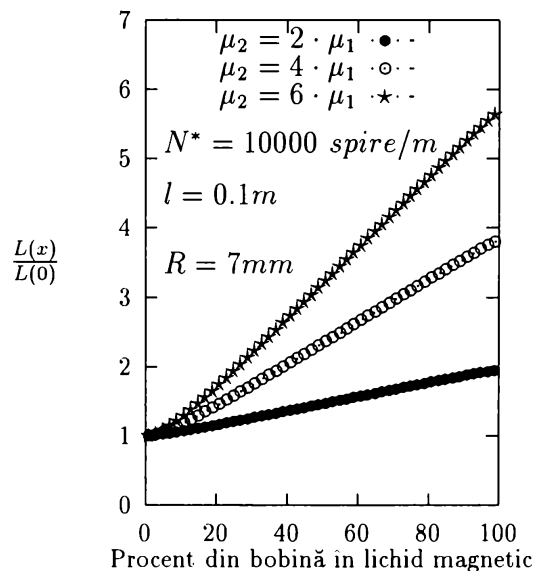


Figura 4.8: Variația relativă a inductanței bobinei pentru 3 tipuri diferite de lichide magnetice

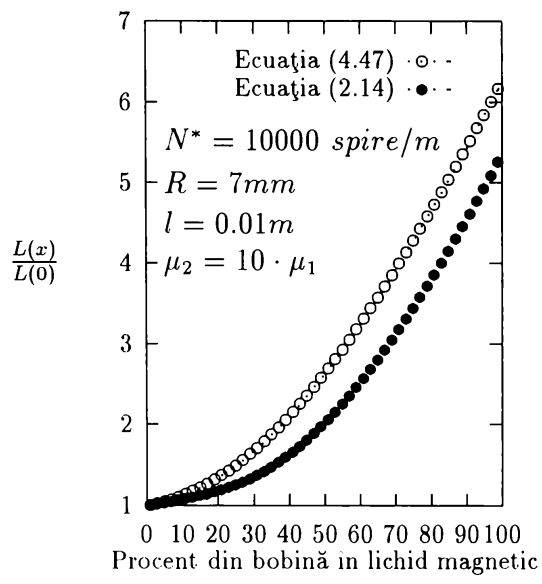


Figura 4.9: Variația relativă a inductanței bobinei calculată prin două metode diferite (100 spire)

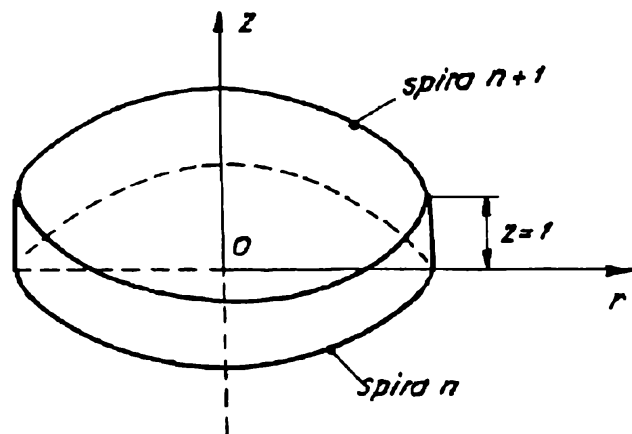


Figura 4.11: Cilindru de analiză a fluxului magnetic creat de două spire circulare plane, identice, plasate în $z=0$ și respectiv $z=1$

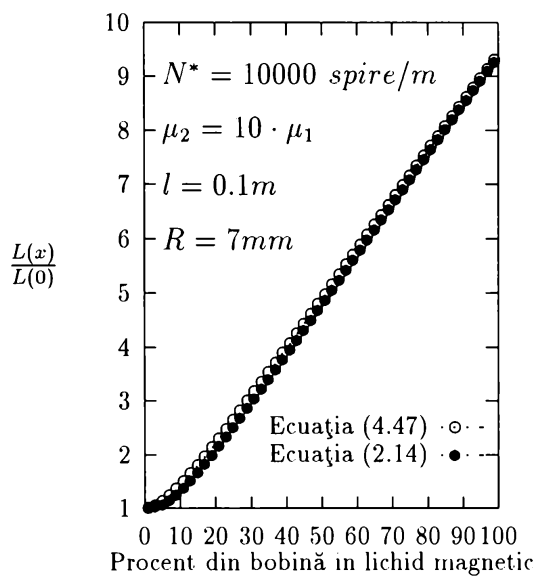


Figura 4.10: Variația relativă a inductanței bobinei calculată prin două metode diferite (1000 spire)

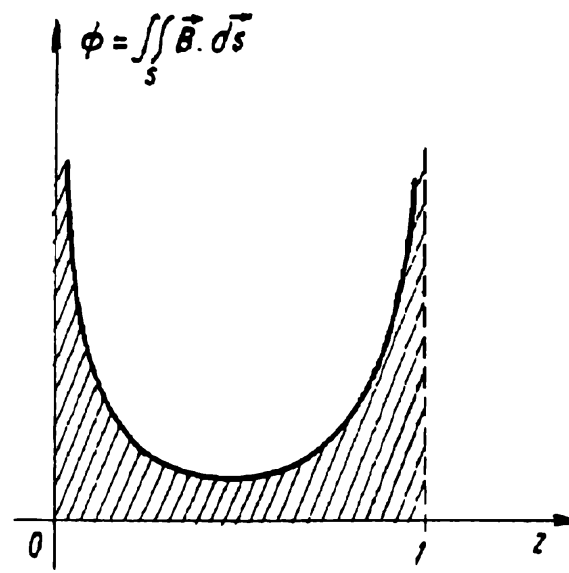


Figura 4.12: Variația fluxului magnetic în funcție de poziția secțiunii prin cilindru de analiză

carcasei și a ecranului, se ajunge la situația din figura 4.2, care permite și o abordare analitică a calculului inductanței bobinei.

Posibilitățile de calcul analitic prezentate mai jos, se bazează pe utilizarea metodei imaginilor pentru calculul câmpului magnetic în mediu neomogen dar liniar, metodă care duce la obținerea unor relații de calcul diferite pentru punctele spațiului aflate în medii diferite.

A. O posibilitate de evitare a valorii infinite a inductanței bobinei filiforme este calcularea fluxului magnetic numai până la o anumită distanță de spirele bobinei (nu pe întreaga suprafață a spirelor). Valoarea inductanței astfel calculate depinde în mod hotărâtor de mărimea porțiunii din suprafață omisă. Un caz particular al acestei soluții îl reprezintă admiterea unei valori constante (valoare finită, calculată în prealabil) a vectorului inducție magnetică în vecinătatea spirei sau pe întreaga suprafață delimitată de spiră.

Expresia inductivității bobinei calculată pe baza vectorului inducție magnetică de pe axa centrală a bobinei a fost prezentată deja în capitolul 2 (relația (2.14)).

B. O altă posibilitate de evitare a valorii infinite a inductanței bobinei este considerarea spirelor bobinei ca fiind reale (conductorul lor având dimensiuni fizice precizate) atunci când li se calculează fluxul propriu și filiforme pentru orice altă situație. Un astfel de calcul a fost prezentat în capitolul 3, unde s-a folosit relația cunoscută de calcul al inductanței proprii a unei spire reale circulare plane.

C. În continuare se prezintă o nouă metodă originală de calcul a inductivității bobinei (filiforme) din figura 4.2, funcție de nivelul lichidului magnetic. Deși fluxul vectorului inducție magnetică se calculează pe întreaga suprafață a spirelor bobinei, luându-se în considerare inclusiv valoarea sa infinită din vecinătatea spirei, totuși inductanța obținută pentru bobină este finită. Metoda se bazează pe o integrare pe verticală a fluxului magnetic corespunzător unei spire, integrare care poate fi acceptată și în ideea că de fapt spirele bobinei nu sunt plane. Pe baza unor programe de calcul și de reprezentare grafică elaborate de autor se prezintă grafic diferențele între inductanțele acelorași bobine calculate prin metode diferite.

4.2 Cazul unui element de circuit în prezența lichidului magnetic

Este cunoscută metoda calculării vectorului inducție magnetică într-un punct oarecare din vecinătatea unei spire circulare plane (aflată în mediu liniar, omogen, izotrop și fără magnetizație permanentă) utilizând potențialul magnetic vector ([52]). În acest caz rezultatul este o combinație de integrale eliptice complete de speța I și II. Deoarece integrarea analitică succesivă a integralelor eliptice (integrare succesivă care ar apare în calculul traductoarelor) este foarte dificilă (sau imposibilă), s-a evitat explicitarea acestora pe parcursul calculelor care urmează. Deasemenea, utilizarea potențialului magnetic vector în algoritmul de calcul analitic nu se justifică.

Fie un cerc Γ , de rază R , un sistem de coordonate cartezian cu originea în centrul cercului și un punct $P(r \cdot \cos\varphi, r \cdot \sin\varphi, h)$ în exteriorul planului cercului. Cercul se află în planul xOy (fig. 4.3).

Considerăm elementul de lungime $d\vec{l}$ al cercului plasat în punctul $A'(R, 0, 0)$. Dacă mediul este liniar, omogen, izotrop și fără magnetizație permanentă, de permeabilitate

magnetică μ , conform teoremei Biot - Savart vectorul inducție magnetică $d\vec{B}_s$ în punctul P, produs de elementul de circuit $d\vec{l}$ parcurs de curentul i_c , are expresia

$$d\vec{B}_s = \frac{\mu i_c}{4\pi |r'|^3} \cdot (d\vec{l} \times \vec{r}') \quad (4.1)$$

unde:

$$\vec{r}' = (r \cdot \cos\varphi - R) \cdot \vec{i} + r \cdot \sin\varphi \cdot \vec{j} + h \cdot \vec{k} \quad (4.2)$$

$$d\vec{l} = R \cdot d\varphi \cdot \vec{j}. \quad (4.3)$$

Deci,

$$d\vec{B}_s = \frac{\mu i_c R}{4\pi} \cdot \frac{h \cdot \vec{i} + (R - r \cdot \cos\varphi) \cdot \vec{k}}{(r^2 + R^2 + h^2 - 2Rr \cdot \cos\varphi)^{\frac{3}{2}}} \cdot d\varphi \quad (4.4)$$

Sau, într-un sistem de coordonate cilindrice de versori \vec{e}_r , \vec{e}_φ , și \vec{k} , dacă

$$d\vec{B}_s = dB_{sr} \cdot \vec{e}_r + dB_{sz} \cdot \vec{k} \quad (4.5)$$

atunci:

$$dB_{sr} = \frac{\mu i_c R h}{4\pi} \cdot \frac{\cos\varphi}{(r^2 + R^2 + h^2 - 2Rr \cdot \cos\varphi)^{\frac{3}{2}}} \cdot d\varphi \quad (4.6)$$

$$dB_{sz} = \frac{\mu i_c R}{4\pi} \cdot \frac{(R - r \cdot \cos\varphi)}{(r^2 + R^2 + h^2 - 2Rr \cdot \cos\varphi)^{\frac{3}{2}}} \cdot d\varphi \quad (4.7)$$

Pentru calculul câmpului magnetic produs de elementul de circuit $d\vec{l}$ în prezența lichidului magnetic considerat pe porțiunea liniară a curbei de magnetizare, se analizează cazul a două semispații infinite, având permeabilitățile magnetice absolute μ_1 și μ_2 . Planul cercului Γ este paralel cu suprafața de separație a celor două medii.

Câmpul determinat de elementul de circuit se poate calcula cu metoda imaginilor electrice rezultând următoarele:

- Câmpul în mediul în care se află elementul de circuit $d\vec{l}$ (μ_1) se presupune produs de $d\vec{l}$ parcurs de curentul i_c , împreună cu imaginea sa în raport cu suprafața de separație dintre medii, dar parcursă de curentul i' , ambele elemente de circuit fiind considerate în același mediu omogen cu permeabilitatea magnetică a mediului în care se află $d\vec{l}$ (μ_1).

$$i' = \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2 + \mu_1} \cdot i_c \quad ; \quad (4.8)$$

- Câmpul în celălalt mediu (μ_2) se presupune generat de elementul de circuit dat situat într-un mediu omogen de permeabilitate magnetică μ_2 și parcurs de curentul i'' .

$$i'' = \frac{2\mu_1}{\mu_2 + \mu_1} \cdot i_c \quad (4.9)$$

Deoarece în calculul inductanței bobinei se folosește numai componenta vectorului inducție magnetică după axa Oz, calculele următoare se vor referi numai la această componentă.

Se folosesc notațiile:

$$A = R^2 + r^2 - 2Rr \cdot \cos\varphi \quad (4.10)$$

și

$$[(dBsz)_1]_2 = \quad (4.11)$$

=componenta vectorului inducție magnetică de direcție z, într-un punct din mediul 1, realizată de un element de circuit plasat în mediul 2.

Cu aceste precizări, dacă distanța de la planul cercului Γ la planul de separație a celor două medii este $z \geq 0$, componenta vectorului inducție magnetică $dBsz$ într-un punct P de coordonate cilindrice P(r,φ,h) este:

- Pentru mediul μ_1 ($h \geq 0$)

$$[(dBsz)_1]_1 = \frac{i_c R \mu_1}{4\pi} \cdot \left\{ \frac{(R - r \cdot \cos\varphi)}{[A + (h - z)^2]^{\frac{3}{2}}} + \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2 + \mu_1} \cdot \frac{(R - r \cdot \cos\varphi)}{[A + (h + z)^2]^{\frac{3}{2}}} \right\} \cdot d\varphi \quad (4.12)$$

- Pentru mediul μ_2 ($h \leq 0$)

$$[(dBsz)_2]_1 = \frac{i_c R \mu_1 \mu_2}{2\pi(\mu_1 + \mu_2)} \cdot \frac{(R - r \cdot \cos\varphi)}{[A + (h - z)^2]^{\frac{3}{2}}} \cdot d\varphi \quad (4.13)$$

Dacă elementul de circuit se află în mediul μ_2 , la distanța $z \leq 0$ față de planul de separație a celor două medii, componentele vectorului inducție magnetică $dBsz$ în același punct de coordonate P(r,φ,h) sunt:

- Pentru mediul μ_1 ($h \geq 0$)

$$[(dBsz)_1]_2 = \frac{i_c R \mu_1 \mu_2}{2\pi(\mu_1 + \mu_2)} \cdot \frac{(R - r \cdot \cos\varphi)}{[A + (h - z)^2]^{\frac{3}{2}}} \cdot d\varphi \quad (4.14)$$

- Pentru mediul μ_2 ($h \leq 0$)

$$[(dBsz)_2]_2 = \frac{i_c R \mu_2}{4\pi} \cdot \left\{ \frac{(R - r \cdot \cos\varphi)}{[A + (h - z)^2]^{\frac{3}{2}}} + \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_1 + \mu_2} \cdot \frac{(R - r \cdot \cos\varphi)}{[A + (h + z)^2]^{\frac{3}{2}}} \right\} \cdot d\varphi \quad (4.15)$$

Evident pentru $h=0$ componentele normale la suprafața de separație dintre cele două medii verifică condițiile de continuitate:

$$[(dBsz)_1]_1^{h=0} = [(dBsz)_2]_1^{h=0} \quad , \quad (4.16)$$

$$[(dBsz)_1]_2^{h=0} = [(dBsz)_2]_2^{h=0} \quad , \quad (4.17)$$

iar dacă ar fi câte un element de circuit în fiecare mediu

$$[(dBsz)_1]_{1+2}^{h=0} = [(dBsz)_2]_{1+2}^{h=0} \quad (4.18)$$

Din analiza relațiilor (4.12) ... (4.15) se observă că formal

$$[(dBsz)_1]_2 = [(dBsz)_2]_1$$

iar $[(dBsz)_1]_1$ diferă de $[(dBsz)_2]_2$ prin aceea că μ_1 se înlocuiește cu μ_2 și reciproc.

Printr-un procedeu apropiat în [53] s-a calculat în totalitate valoarea vectorului inducție magnetică pentru o spiră circulară plană, aflată în vecinătatea lichidului magnetic.

4.3 Cazul unui element de bobină în prezența lichidului magnetic

Fie o bobină uniform bobinată de secțiune circulară cu raza R și de lungime l , formată printr-o suprapunere pe verticală a unui număr mare de spire circulare, filiforme și plane. Considerăm bobina plasată într-un mediu omogen cu permeabilitatea magnetică absolută μ .

Definim elementul de bobină ca fiind format prin suprapunerea pe verticală a tuturor elementelor de circuit $R \cdot d\varphi$ de unghi la centru $\varphi = 0$, elemente aparținând spirelor bobinei. Punctul P de coordonate cilindrice $P(r, \varphi, 0)$ se află la distanța h_1 față de capătul de jos al elementului de bobină (fig. 4.4). Pentru un număr foarte mare de elemente de circuit pe unitatea de lungime a elementului de bobină, componenta $dBbz$ a vectorului inducție magnetică creat de elementul de bobină în punctul P este aproximată foarte bine de expresia

$$dBbz = N^* \int_{h_1}^{-(l-h_1)} dBsz \cdot dh \quad (4.19)$$

unde N^* este numărul de elemente de circuit pe unitatea de lungime a elementului de bobină iar $dBsz$ se găsește în egalitatea (4.7)

Dacă elementul de bobină se află în prezența lichidului magnetic având planul spirelor paralel cu suprafața de separație dintre cele două medii și fiind plasat integral într-unul din medii (de exemplu în mediul μ_1) la distanța $z_1 > 0$ față de suprafața de separație dintre medii (fig. 4.5), pentru un punct $P(r, \varphi, h)$ expresia proiecției vectorului inducție magnetică, pe axa z ($dBbz$) se scrie:

$$[dBbz]_1 = N^* \int_{z_1}^{z_1+l} [dBsz]_1 \cdot dz \quad (4.20)$$

unde $[dBsz]_1$ se găsește în egalitatea (4.12) pentru punctele din mediul μ_1 ($h \geq 0$) și respectiv în egalitatea (4.13) pentru punctele din mediul μ_2 ($h \leq 0$).

În cazul particular când $z_1 = 0$, relația (4.20) devine:

$$[dBbz]_1 = N^* \int_0^l [dBsz]_1 \cdot dz \quad (4.21)$$

În situația în care elementul de bobină este cufundat parțial în lichid magnetic (fig. 4.6), cu teorema superpoziției problema se descompune în stările reprezentate în figura 4.7 care se încadrează în metodologia prezentată anterior (cazul $z_1 = 0$).

Respectiv vectorul inducție magnetică $[d\vec{B}b]_1$, creat de porțiunea de element de bobină de lungime l_1 (plasat în mediul μ_1), într-un punct P(r,φ,h) este dat de

$$[d\vec{B}b]_1 = [dBbr]_1 \cdot \vec{e}_r + [dBbz]_1 \cdot \vec{k} \quad , \quad (4.22)$$

unde,

$$[dBbz]_1 = N^* \int_0^{l_1} [dBsz]_1 \cdot dz \quad , \quad (4.23)$$

$[dBsz]_1$ fiind dat de (4.12) pentru punctele din mediul μ_1 și respectiv de (4.13) pentru punctele din mediul μ_2 .

Vectorul inducție magnetică $[d\vec{B}b]_2$ creat de porțiunea de element de bobină de lungime l_2 (plasat în mediul μ_2), în același punct P(r,φ,h) este dat de

$$[d\vec{B}b]_2 = [dBbr]_2 \cdot \vec{e}_r + [dBbz]_2 \cdot \vec{k} \quad , \quad (4.24)$$

unde,

$$[dBbz]_2 = N^* \int_{-l_2}^0 [dBsz]_2 \cdot dz \quad (4.25)$$

În această situație $[dBsz]_2$ este dat de egalitatea (4.14) pentru punctele din mediul μ_1 și respectiv de egalitatea (4.15) pentru punctele din mediul μ_2 .

Valoarea totală a vectorului inducție magnetică $d\vec{B}b$ în punctul P este

$$d\vec{B}b = [d\vec{B}b]_1 + [d\vec{B}b]_2 = [dBbr]_{1+2} \cdot \vec{e}_r + [dBbz]_{1+2} \cdot \vec{k} \quad , \quad (4.26)$$

unde în mediul μ_1 ,

$$[(dBbz)_{1+2}]_1 = N^* \left\{ \int_0^{l_1} [(dBsz)_{1+2}]_1 \cdot dz + \int_{-l_2}^0 [(dBsz)_{1+2}]_2 \cdot dz \right\} \quad (4.27)$$

iar în mediul μ_2 ,

$$[(dBbz)_{1+2}]_2 = N^* \left\{ \int_0^{l_1} [(dBsz)_{1+2}]_1 \cdot dz + \int_{-l_2}^0 [(dBsz)_{1+2}]_2 \cdot dz \right\} \quad (4.28)$$

Calculăm în detaliu mărimile $[(dBbz)_{1+2}]_1$ și $[(dBbz)_{1+2}]_2$.

Pentru relația (4.27)

$$\begin{aligned} \int_0^{l_1} [(dBsz)_{1+2}]_1 \cdot dz &= \frac{i_c R \mu_1}{4\pi} (R - r \cdot \cos\varphi) \cdot \\ \cdot \left\{ \int_0^{l_1} \frac{dz}{[A + (h - z)^2]^{\frac{3}{2}}} + \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2 + \mu_1} \int_0^{l_1} \frac{dz}{[A + (h + z)^2]^{\frac{3}{2}}} \right\} \cdot d\varphi \end{aligned} \quad (4.29)$$

Înlocuind valorile integralelor după variabila z, obținem:

$$\begin{aligned} \int_0^{l_1} [(dBsz)_{1+2}]_1 \cdot dz &= \frac{i_c R \mu_1}{4\pi} \cdot \frac{R - r \cdot \cos\varphi}{A} \cdot \\ \cdot \left[\frac{l_1 - h}{\sqrt{A + (h - l_1)^2}} + \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2 + \mu_1} \cdot \frac{l_1 + h}{\sqrt{A + (h + l_1)^2}} + \right. \\ \left. + \frac{2\mu_1}{\mu_1 + \mu_2} \cdot \frac{h}{\sqrt{A + h^2}} \right] \cdot d\varphi \end{aligned} \quad (4.30)$$

A doua integrală din (4.27) are valoarea

$$\int_{-l_2}^0 [(dBsz)_1]_2 \cdot dz = \frac{i_c R \mu_1 \mu_2}{2\pi(\mu_1 + \mu_2)} \cdot \frac{(R - r \cdot \cos\varphi)}{A} \cdot \left[-\frac{h}{\sqrt{A + h^2}} + \frac{l_2 + h}{\sqrt{A + (h + l_2)^2}} \right] \cdot d\varphi \quad (4.31)$$

Cu (4.30) și (4.31) egalitatea (4.27) devine (4.32):

$$[(dBbz)_1]_{1+2} = \frac{i_c R N^* \mu_1}{4\pi} \cdot \frac{(R - r \cdot \cos\varphi)}{A} \cdot \left[\frac{l_1 - h}{\sqrt{A + (h - l_1)^2}} + \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2 + \mu_1} \cdot \frac{l_1 + h}{\sqrt{A + (h + l_1)^2}} + \frac{2\mu_2}{\mu_1 + \mu_2} \cdot \frac{l_2 + h}{\sqrt{A + (h + l_2)^2}} + \frac{2(\mu_1 - \mu_2)}{\mu_1 + \mu_2} \cdot \frac{h}{\sqrt{A + h^2}} \right] \cdot d\varphi \quad (4.32)$$

Procedând în mod analog egalitatea (4.28) devine (4.33):

$$[(dBbz)_2]_{1+2} = \frac{i_c R N^* \mu_2}{4\pi} \cdot \frac{(R - r \cdot \cos\varphi)}{A} \cdot \left[\frac{l_2 + h}{\sqrt{A + (h + l_2)^2}} - \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_1 + \mu_2} \cdot \frac{h - l_2}{\sqrt{A + (h - l_2)^2}} + \frac{2\mu_1}{\mu_1 + \mu_2} \cdot \frac{l_1 - h}{\sqrt{A + (h - l_1)^2}} + \frac{2(\mu_1 - \mu_2)}{\mu_1 + \mu_2} \cdot \frac{h}{\sqrt{A + h^2}} \right] \cdot d\varphi \quad (4.33)$$

Pentru $h=0$ componentele normale la suprafața de separație dintre medii trebuie să verifice condiția de continuitate:

$$[(dBbz)_1]_{1+2}^{h=0} = [(dBbz)_2]_{1+2}^{h=0}$$

Efectuând calculele

$$[(dBbz)_1]_{1+2}^{h=0} = \frac{i_c R N^* \mu_1 \mu_2}{2\pi(\mu_1 + \mu_2)} \cdot \frac{(R - r \cdot \cos\varphi)}{A} \cdot \left[\frac{l_1}{\sqrt{A + l_1^2}} + \frac{l_2}{\sqrt{A + l_2^2}} \right] \cdot d\varphi = [(dBbz)_2]_{1+2}^{h=0} ,$$

deci condiția de continuitate este verificată.

Printr-un procedeu apropiat, în [54] s-a calculat în totalitate valoarea vectorului inducție magnetică pentru o bobină circulară în prezența lichidului magnetic.

Prescurtat expresiile (4.32) și (4.33) se pot scrie:

$$[(dBbz)_1]_{1+2} = \frac{i_c R N^* \mu_1}{4\pi} \cdot \frac{(R - r \cdot \cos\varphi)}{A(R, r, \varphi)} \cdot g_1[A(R, r, \varphi), h] \cdot d\varphi \quad (4.34)$$

și respectiv

$$[(dBbz)_2]_{1+2} = \frac{i_c R N^* \mu_2}{4\pi} \cdot \frac{(R - r \cdot \cos\varphi)}{A(R, r, \varphi)} \cdot g_2[A(R, r, \varphi), h] \cdot d\varphi \quad (4.35)$$

Fluxul vectorului inducție magnetică creat de elementul de bobină, printr-o secțiune circulară plană S_1 , paralelă cu planul cercurilor, considerată în mediul μ_1 la înălțimea $h = h_1$, este:

$$[(d\Psi)_1]_{1+2}^{h=h_1} = \iint_{S_1} [(dBbz)_1]_{1+2}^{h=h_1} \cdot ds$$

Fluxul total ce înlănțuie suprafețele circulare din mediul μ_1 este:

$$\begin{aligned} [(d\Psi)_1]_{1+2} &= \sum_{m=1}^{N^* l_1} [(d\Psi)_1]_{1+2}^{h=h_m} = \\ &= \sum_{m=1}^{N^* l_1} \iint_{S_m} [(dBbz)_1]_{1+2}^{h=h_m} \cdot ds \end{aligned} \quad (4.36)$$

Suprafețele spirelor fiind egale între ele (și egale cu S), integrala de suprafață a lui $dBbz$ depinde numai de h și putem scrie:

$$[(d\Psi)_1]_{1+2} = \iint_S \left(\sum_{m=1}^{N^* l_1} [(dBbz)_1]_{1+2}^{h=h_m} \right) \cdot ds \quad (4.37)$$

Dacă (pentru N^* foarte mare) suma de sub integrala dublă se aproximează cu

$$\sum_{m=1}^{N^* l_1} [(dBbz)_1]_{1+2}^{h=h_m} = N^* \int_0^{l_1} [(dBbz)_1]_{1+2} \cdot dh \quad (4.38)$$

atunci:

$$[(d\Psi)_1]_{1+2} = N^* \iint_S \left(\int_0^{l_1} [(dBbz)_1]_{1+2} \cdot dh \right) \cdot ds \quad (4.39)$$

Practic, prin această aproximare, elementul de bobină prezentat anterior, s-a redus la un element de spirală fictivă, care este străbătută în fiecare punct din planul său de un vector inducție magnetică perpendicular pe plan și egal ca modul cu integrala pe verticală a componenteii după Oz a vectorului inducție magnetică a elementului de bobină.

Ținând seama și de expresia (4.34), valoarea fluxului magnetic prin secțiunile circulare din mediul μ_1 este:

$$\begin{aligned} [(d\Psi)_1]_{1+2} &= \frac{i_c R N^{*2} \mu_1}{4\pi} \iint_S \left(\frac{(R - r \cdot \cos\varphi) \cdot d\varphi}{A(R, r, \varphi)} \cdot \right. \\ &\quad \left. \int_0^{l_1} g_1[A(R, r, \varphi), h] \cdot dh \right) \cdot ds \end{aligned} \quad (4.40)$$

Analog, valoarea fluxului magnetic prin secțiunile circulare din mediul μ_2 este:

$$[(d\Psi)_2]_{1+2} = \frac{i_c R N^2 \mu_2}{4\pi} \iint_S \left(\frac{(R - r \cdot \cos\varphi) \cdot d\varphi}{A(R, r, \varphi)} \cdot \int_{-l_2}^0 g_2[A(R, r, \varphi), h] \cdot dh \right) \cdot ds \quad (4.41)$$

Cu (4.40) și (4.41), expresia fluxului magnetic prin secțiunile circulare din ambele medii este:

$$[(d\Psi)_{1+2}]_{1+2} = \frac{i_c R N^2}{4\pi} \iint_S \left(\frac{(R - r \cdot \cos\varphi) \cdot d\varphi}{A(R, r, \varphi)} \cdot \left\{ \mu_1 \int_0^{l_1} g_1[A(R, r, \varphi), h] \cdot dh + \mu_2 \int_{-l_2}^0 g_2[A(R, r, \varphi), h] \cdot dh \right\} \right) \cdot ds \quad (4.42)$$

Rezolvând integralele după variabila h ([55]) se obține:

$$\begin{aligned} \int_0^{l_1} g_1(A, h) \cdot dh &= \frac{1}{\mu_1 + \mu_2} [2(2\mu_1 - \mu_2)\sqrt{A + l_1^2} + \\ &+ (\mu_2 - \mu_1)\sqrt{A + 4l_1^2} - (3\mu_1 - \mu_2)\sqrt{A} + \\ &+ 2\mu_2(\sqrt{A + (l_1 + l_2)^2} - \sqrt{A + l_2^2})] \end{aligned} \quad (4.43)$$

și

$$\begin{aligned} \int_{-l_2}^0 g_2(A, h) \cdot dh &= \frac{1}{\mu_1 + \mu_2} [(\mu_1 - \mu_2)\sqrt{A + 4l_2^2} + \\ &+ 2\mu_1(\sqrt{A + (l_1 + l_2)^2} - \sqrt{A + l_1^2}) - (3\mu_2 - \mu_1)\sqrt{A} + \\ &+ 2(2\mu_2 - \mu_1)\sqrt{A + l_2^2}] \end{aligned} \quad (4.44)$$

Deci (4.42) ajunge la forma (4.45) care reprezintă fluxul magnetic total (din mediul 1 și 2) prin spira fictivă, flux creat de un element de spiră fictivă $d\varphi$.

$$[(d\Psi)_{1+2}]_{1+2} = \frac{i_c R N^2}{4\pi(\mu_1 + \mu_2)} \iint_S \left(\frac{(R - r \cdot \cos\varphi) \cdot d\varphi}{A} \cdot \left[(\mu_2 - \mu_1)(\mu_1\sqrt{A + 4l_1^2} - \mu_2\sqrt{A + 4l_2^2}) + \right. \right. \\ \left. \left. + 4(\mu_1 - \mu_2)(\mu_1\sqrt{A + l_1^2} - \mu_2\sqrt{A + l_2^2}) + \right. \right. \\ \left. \left. + 4\mu_1\mu_2\sqrt{A + (l_1 + l_2)^2} - (3\mu_1^2 + 3\mu_2^2 - 2\mu_1\mu_2)\sqrt{A} \right] \right) \cdot ds \quad (4.45)$$

4.4 Cazul întregii bobine

Fluxul magnetic exprimat de relația (4.45) este același indiferent de poziția elementului $d\varphi$ de pe spira fictivă. Deci fluxul creat de întreaga spiră fictivă prin suprafața ei este

$$[(\Psi)_{1+2}]_{1+2} = \int_0^{2\pi} [(d\Psi)_{1+2}]_{1+2} = 2\pi \frac{[(d\Psi)_{1+2}]_{1+2}}{d\varphi} =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{i_c RN^{*2}}{2(\mu_1 + \mu_2)} \iint_S \left(\frac{(R - r \cdot \cos\varphi)}{A} \cdot \right. \\
&\cdot [(\mu_2 - \mu_1)(\mu_1 \sqrt{A + 4l_1^2} - \mu_2 \sqrt{A + 4l_2^2}) + \\
&+ 4(\mu_1 - \mu_2)(\mu_1 \sqrt{A + l_1^2} - \mu_2 \sqrt{A + l_2^2}) + \\
&\left. + 4\mu_1 \mu_2 \sqrt{A + (l_1 + l_2)^2} - (3\mu_1^2 + 3\mu_2^2 - 2\mu_1 \mu_2) \sqrt{A}] \right) \cdot ds \quad (4.46)
\end{aligned}$$

unde făcând schimbările de notație:

$$\begin{aligned}
l_1 + l_2 &= l \\
l_2 &= x \\
l_1 &= l - x
\end{aligned}$$

putem obține expresia inductanței bobinei din figura 4.2, în funcție de adâncimea x până la care se cufundă bobina în lichid magnetic.

$$\begin{aligned}
L(x) &= \frac{RN^{*2}}{2(\mu_1 + \mu_2)} \iint_S \left(\frac{(R - r \cdot \cos\varphi)}{A} \cdot \right. \\
&\cdot [(\mu_2 - \mu_1)(\mu_1 \sqrt{A + 4(l-x)^2} - \mu_2 \sqrt{A + 4x^2}) + \\
&+ 4(\mu_1 - \mu_2)(\mu_1 \sqrt{A + (l-x)^2} - \mu_2 \sqrt{A + x^2}) + \\
&\left. + 4\mu_1 \mu_2 \sqrt{A + l^2} - (3\mu_1^2 + 3\mu_2^2 - 2\mu_1 \mu_2) \sqrt{A}] \right) \cdot ds \quad (4.47)
\end{aligned}$$

Se poate observa că egalitatea (2.14) este un caz particular al egalității (4.47). Dacă în (4.47) considerăm că expresia de sub integrala de suprafață are aceeași valoare în toate punctele suprafeței S , valoare obținută pentru $r=0$ (axa centrală), atunci (4.47) devine (2.14).

Figura 4.8 prezintă variația relativă a lui $L(x)$ pentru 3 tipuri diferite de lichide magnetice, variație calculată pe baza ecuației (4.47). În figurile 4.9 și 4.10 se prezintă comparativ variația relativă a inductanței aceleiași bobine, calculată prin două metode diferite. Inductanța calculată cu egalitatea (4.47) este mai mare decât inductanța calculată cu egalitatea (2.14) datorită faptului că valoarea fluxului magnetic este mai mare în vecinătatea conductorului decât în centrul spirei ([56]).

Expresia (4.47) se mai poate scrie și sub forma:

$$\begin{aligned}
L(x) &= \frac{RN^{*2}}{2(\mu_1 + \mu_2)} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^R \frac{r(R - r \cdot \cos\varphi)}{A} \cdot \\
&\cdot [(\mu_2 - \mu_1)(\mu_1 \sqrt{A + 4(l-x)^2} - \mu_2 \sqrt{A + 4x^2}) + \\
&+ 4(\mu_1 - \mu_2)(\mu_1 \sqrt{A + (l-x)^2} - \mu_2 \sqrt{A + x^2}) + \\
&+ 4\mu_1 \mu_2 \sqrt{A + l^2} - (3\mu_1^2 + 3\mu_2^2 - 2\mu_1 \mu_2) \sqrt{A}] \cdot dr \quad (4.48)
\end{aligned}$$

Calculul integralei după variabila r se poate efectua analitic și se obține expresia:

$$L(x) = \frac{RN^{*2}}{2(\mu_1 + \mu_2)} \{f_0(\mu_1, \mu_2) \int_0^{2\pi} F_0(\varphi, R) d\varphi +$$

$$+ \sum_{i=1}^5 [f_i(\mu_1, \mu_2) \int_0^{2\pi} F(\varphi, R, B_i) d\varphi] \quad (4.49)$$

unde:

$$\begin{aligned} f_0(\mu_1, \mu_2) &= 2\mu_1\mu_2 - 3\mu_1^2 - 3\mu_2^2 \\ f_1(\mu_1, \mu_2) &= \mu_1(\mu_2 - \mu_1) \\ f_2(\mu_1, \mu_2) &= \mu_2(\mu_1 - \mu_2) \\ f_3(\mu_1, \mu_2) &= 4\mu_1(\mu_1 - \mu_2) \\ f_4(\mu_1, \mu_2) &= 4\mu_2(\mu_2 - \mu_1) \\ f_5(\mu_1, \mu_2) &= 4\mu_1\mu_2 \end{aligned} \quad (4.50)$$

$$\begin{aligned} B_1 &= 2(l - x) \\ B_2 &= 2x \\ B_3 &= l - x \\ B_4 &= x \\ B_5 &= l \end{aligned} \quad (4.51)$$

$$\begin{aligned} F_0(\varphi, R) &= \frac{1}{2}R^2\sqrt{2(1 - \cos \varphi)}(2 - \cos \varphi - 3\cos^2 \varphi) - \\ &- \frac{1}{2}R^2(2 - 3\cos^2 \varphi) + \frac{3}{2}R^2 \sin^2 \varphi \cos \varphi \ln(1 + \\ &+ \sqrt{\frac{2}{1 - \cos \varphi}}) \end{aligned} \quad (4.52)$$

$$\begin{aligned} F(\varphi, R, B_i) &= \frac{1}{2}R\sqrt{2R^2(1 - \cos \varphi) + B_i^2}(2 - \cos \varphi - 3\cos^2 \varphi) - \\ &- \frac{1}{2}R\sqrt{R^2 + B_i^2}(2 - 3\cos^2 \varphi) + \frac{1}{2}RB_i(1 - 2\cos^2 \varphi) \cdot \\ &\cdot \ln \frac{(B_i - \sqrt{2R^2(1 - \cos \varphi) + B_i^2})(B_i + \sqrt{R^2 + B_i^2})}{(B_i + \sqrt{2R^2(1 - \cos \varphi) + B_i^2})(B_i - \sqrt{R^2 + B_i^2})} + \frac{1}{2} \cos \varphi \cdot \\ &\cdot (3R^2 \sin^2 \varphi - B_i^2) \ln \frac{\sqrt{2R^2(1 - \cos \varphi) + B_i^2} + R(1 - \cos \varphi)}{\sqrt{R^2 + B_i^2} - R \cos \varphi} + \\ &+ 2RB_i \sin \varphi \cos \varphi \arctan \\ &\frac{B_i \sin \varphi [(1 - \cos \varphi)\sqrt{R^2 + B_i^2} + \cos \varphi \sqrt{2R^2(1 - \cos \varphi) + B_i^2}]}{B_i^2 \cos \varphi (1 - \cos \varphi) + \sin^2 \varphi \sqrt{R^2 + B_i^2} \sqrt{2R^2(1 - \cos \varphi) + B_i^2}} \end{aligned} \quad (4.53)$$

Funcțiile (4.52) și (4.53) au sens pentru $\cos \varphi \neq 1$ deci $\varphi \neq 0$ și $\varphi \neq 2\pi$.

$$\lim_{\varphi \rightarrow 0} F_0(\varphi, R) = +\infty$$

$$\lim_{\varphi \rightarrow 2\pi} F_0(\varphi, R) = +\infty$$

$$\lim_{\varphi \rightarrow 0} F(\varphi, R, B_i) = -\infty$$

$$\lim_{\varphi \rightarrow 2\pi} F(\varphi, R, B_i) = -\infty$$

Deci suntem în cazul unor integrale definite de funcții nemărginite în intervalul de integrare și înainte de a trece la un eventual calcul numeric al acestor integrale este necesar să analizăm convergența lor. Se observă că ;

$$F_0(\varphi, R) = F_0(-\varphi), R)$$

$$F(\varphi, R, B_i) = F(-\varphi, R, B_i)$$

deci putem scrie

$$\int_0^{2\pi} F_0(\varphi, R) \cdot d\varphi = 2 \int_0^{\pi} F_0(\varphi, R) \cdot d\varphi$$

$$\int_0^{2\pi} F(\varphi, R, B_i) \cdot d\varphi = 2 \int_0^{\pi} F(\varphi, R, B_i) \cdot d\varphi$$

Pentru funcția $F_0(\varphi, R)$ problema se reduce la a studia convergența pentru:

$$\int_0^{\pi} \sin^2 \varphi \cdot \cos \varphi \cdot \ln \sqrt{1 - \cos \varphi} \cdot d\varphi$$

Notând succesiv:

$$\cos \varphi = \psi_1,$$

$$\ln \sqrt{1 - \psi_1} = \psi_2$$

și aplicând criteriile de convergență cunoscute, se constată că

$$\int_0^{2\pi} F_0(\varphi, R) \cdot d\varphi$$

este convergentă.

Pentru funcția $F(\varphi, R, B_i)$ problema se reduce la a studia convergența pentru:

$$\int_0^{\pi} \ln [\sqrt{2R^2(1 - \cos \varphi) + B_i^2} - B_i] \cdot d\varphi$$

Notând succesiv:

$$\cos \varphi = \psi_3,$$

$$\sqrt{2R^2(1 - \psi_3) + B_i^2} = \psi_4$$

$$\ln (\psi_4 - B_i) = \psi_5$$

și aplicând criteriile de convergență se constată că și

$$\int_0^{2\pi} F(\varphi, R, B_i) \cdot d\varphi$$

este convergentă.

Formula (4.49) cuprinde o sumă de integrale dintre care unele au primitive foarte greu de exprimat și unele sunt eliptice. Prezența acestora face ca valoarea lui $L(x)$ să poată fi calculată numai prin metode numerice. În acest caz, explicitarea integralelor eliptice complete de modul variabil din formula (4.49) nu se justifică.

Totuși, pentru calculul numeric al expresiei (4.49), este utilă rezolvarea integralelor definite care au primitive și formularea unei noi expresii în care termenii care nu depind de x să fie separați de ceilalți termeni.

Observăm că:

$$\int_0^{2\pi} \frac{1}{2} R \sqrt{R^2 + B_i^2} (2 - 3 \cos^2 \varphi) \cdot d\varphi = \frac{\pi}{2} R \sqrt{R^2 + B_i^2}. \quad (4.54)$$

$$\cdot \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} R^2 (2 - 3 \cos^2 \varphi) \cdot d\varphi = \frac{\pi}{2} R^2 \quad (4.55)$$

Cu aceste precizări, formula lui $L(x)$ devine:

$$\begin{aligned} L(x) = & \frac{RN^{*2}}{\mu_1 + \mu_2} \{ f_0 \int_0^\pi F'_0(\varphi, R) \cdot d\varphi + \\ & + f_5 \int_0^\pi F'(\varphi, R, l) \cdot d\varphi - \frac{\pi}{4} R (R f_0 + \sqrt{R^2 + l^2} \cdot f_5) + \\ & + \sum_{i=1}^4 [f_i \int_0^\pi F'(\varphi, R, B_i) \cdot d\varphi] - \frac{\pi}{4} R \sum_{i=1}^4 [f_i \sqrt{R^2 + B_i^2}] \} \end{aligned} \quad (4.56)$$

unde:

$$\begin{aligned} F'_0(\varphi, R) = & \frac{1}{2} R^2 \sqrt{2(1 - \cos \varphi)} (2 - \cos \varphi - 3 \cos^2 \varphi) + \\ & + \frac{3}{2} R^2 \sin^2 \varphi \cos \varphi \ln \left(1 + \sqrt{\frac{2}{1 - \cos \varphi}} \right) \end{aligned} \quad (4.57)$$

$$\begin{aligned} F'(\varphi, R, B_i) = & \frac{1}{2} R \sqrt{2R^2(1 - \cos \varphi) + B_i^2} (2 - \cos \varphi - \\ & - 3 \cos^2 \varphi) + \frac{1}{2} R B_i (1 - 2 \cos^2 \varphi) \cdot \\ & \cdot \ln \frac{(B_i - \sqrt{2R^2(1 - \cos \varphi) + B_i^2})(B_i + \sqrt{R^2 + B_i^2})}{(B_i + \sqrt{2R^2(1 - \cos \varphi) + B_i^2})(B_i - \sqrt{R^2 + B_i^2})} + \frac{1}{2} \cos \varphi \cdot \\ & \cdot (3R^2 \sin^2 \varphi - B_i^2) \ln \frac{\sqrt{2R^2(1 - \cos \varphi) + B_i^2} + R(1 - \cos \varphi)}{\sqrt{R^2 + B_i^2} - R \cos \varphi} + \\ & + 2R B_i \sin \varphi \cos \varphi \arctan \\ & \frac{B_i \sin \varphi [(1 - \cos \varphi) \sqrt{R^2 + B_i^2} + \cos \varphi \sqrt{2R^2(1 - \cos \varphi) + B_i^2}]}{B_i^2 \cos \varphi (1 - \cos \varphi) + \sin^2 \varphi \sqrt{R^2 + B_i^2} \sqrt{2R^2(1 - \cos \varphi) + B_i^2}} \end{aligned} \quad (4.58)$$

Expresia lui $F'(\varphi, R, B_i)$ în forma (4.58) este valabilă pentru $B_i \neq 0$. Dacă la excursia lichidului magnetic se ating și cazurile particulare când $B_i = 0$ ($x=0$ sau $x=1$), atunci, în acele cazuri particulare, în locul expresiei lui $F'(\varphi, R, B_i)$ se utilizează $F'_0(\varphi, R)$ în forma (4.57).

Avantajele relațiilor (4.56) ... (4.58), (4.50) și (4.51) constau în faptul că sunt mai exacte decât relația (2.14) sau (2.15) și permit încă, o dimensionare rapidă și comodă a traductoarelor inductive cu lichid magnetic.

4.5 Concluzii

Deși integrala de suprafață s-a efectuat pe întreaga suprafață a spirelor filiforme, totuși valoarea inductanței bobinei este finită ([57, 58]).

Particularizând relația (4.56) pentru mediu omogen ($\mu_1 = \mu_2$) și pentru o bobină cu o spiră pe unitatea de lungime, valoarea inductanței acestei bobine ideale este finită (fig. 4.11).

Deci, deși valoarea fluxului magnetic în planul spirei ($z=0$) și eventual în planul spirei următoare ($z=1$) este infinită (fig. 4.12), totuși integrala acestui flux între două spire are o valoare finită (aria cuprinsă între curbele $z=0$, $z=1$, $\Phi = 0$ și $\Phi = \iint_S \vec{B}(z) \cdot d\vec{s}$ este finită). Altfel spus, integrala după variabila z a fluxului magnetic este convergentă ([59]).

5

Calculul numeric al inductanțelor bobinelor traductoarelor inductive cu lichid magnetic

5.1 Bobina reală

Bobina reală aflată în construcția traductoarelor ([36, 37], [60] ... [69]), prezentată în figura 5.1, este cilindrică având lichidul magnetic plasat în interiorul carcasei (1.). Spirele bobinei (2.) nu ating lichidul magnetic (4.). La exterior înfășurarea este protejată cu un ecran feromagnetic (3.). Raza cilindrului de lichid magnetic este notată cu R_L , raza interioară a bobinei cu R_B iar grosimea ei cu G_B , raza interioară a ecranului cilindric cu R_E iar grosimea lui cu G_E . Cilindrul de lichid magnetic se extinde și în exteriorul bobinajului până la o anumită distanță.

Problema care se pune este de a stabili forma de variație a inductivității bobinei reale din figura 5.1, în funcție de înălțimea coloanei de lichid magnetic din interiorul bobinei, informație necesară pentru proiectarea amplificatorului electronic de măsură. Comparând figurile 4.2 și 5.1 se observă că în cazul abordării pe cale analitică a problemei (prin metoda imaginilor), singurii parametri care pot fi variați sunt permeabilitatea magnetică a lichidului, raza bobinei, lungimea bobinei, numărul de spire pe unitatea de lungime și eventual dimensiunea conductorului (fig. 4.2).

Revenind strict la figura 5.1 prezentul capitol stabilește o modalitate originală de dimensionare (proiectare) a bobinelor care ține cont de toți parametrii marcați pe figura 5.1. Bobinajul se consideră uniform iar lichidul magnetic este considerat liniar deoarece \vec{H} fiind mic se lucrează pe porțiunea liniară a curbei de magnetizare. Este evident că un asemenea calcul poate fi făcut numai prin intermediul unei metode de investigare numerică (simulare). Deoarece ansamblul prezintă o simetrie cilindrică (câmpul magnetic al bobinei este plan meridian), pentru calcul este preferabilă metoda diferențelor finite ([70]).

Autorul a realizat un program original de simulare numerică a câmpului magnetic al bobinei utilizând metoda diferențelor finite. Pentru vizualizarea în diverse secțiuni a câmpului magnetic rezultat din calcul s-au elaborat programe originale de reprezentare grafică.

Din relația de calcul al inductivității unei bobine

$$L = \frac{\sum_{k=1}^{NS} \Phi_k}{i} = \sum_{k=1}^{NS} \frac{\Phi_k}{i} \quad (5.1)$$

unde:

L = inductanța bobinei;

i = curentul care străbate spirele bobinei;

NS = numărul de spire al bobinei;

Φ_k = fluxul vectorului inducție magnetică prin suprafața limitată de spira k ,

$$\Phi_k = \int_{S_k} \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (5.2)$$

se observă că pentru determinarea unei inductivități în anumite condiții geometrice și de material este necesară cunoașterea vectorului inducție magnetică în fiecare punct de pe suprafața spirelor care constituie bobina.

Calculul vectorului inducție magnetică \vec{B} într-un punct se poate face prin intermediul potențialului magnetic vector \vec{A} folosind relația

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A}. \quad (5.3)$$

Impunând:

$$\text{div} \vec{A} = 0 \quad (5.4)$$

ecuația vectorială a câmpului magnetic exprimată prin potențialul magnetic vector în regim staționar este:

$$-\Delta \vec{A} = \mu_0 \cdot \vec{J} \quad (5.5)$$

pentru mediile parcurse de curent, și,

$$\Delta \vec{A} = 0 \quad (5.6)$$

pentru mediile dielectrice.

5.2 Domeniul bidimensional de analiză al câmpului

În cazul unui câmp plan meridian, într-un sistem de coordonate cilindrice, \vec{A} are componentă numai după φ ,

$$\vec{A} = A(r, z) \cdot \vec{u}_\varphi, \quad (5.7)$$

componentele vectorului inducție magnetică au expresiile:

$$B_r = -\frac{\partial A}{\partial z}, \quad (5.8)$$

$$B_\varphi = 0, \quad (5.9)$$

$$B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial(rA)}{\partial r}, \quad (5.10)$$

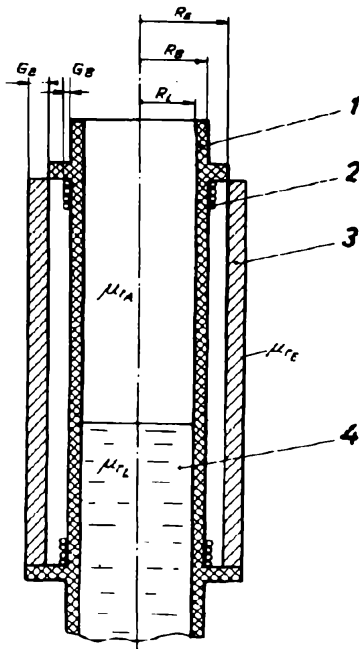


Figura 5.1: Construcția reală a bobinelor traductoarelor

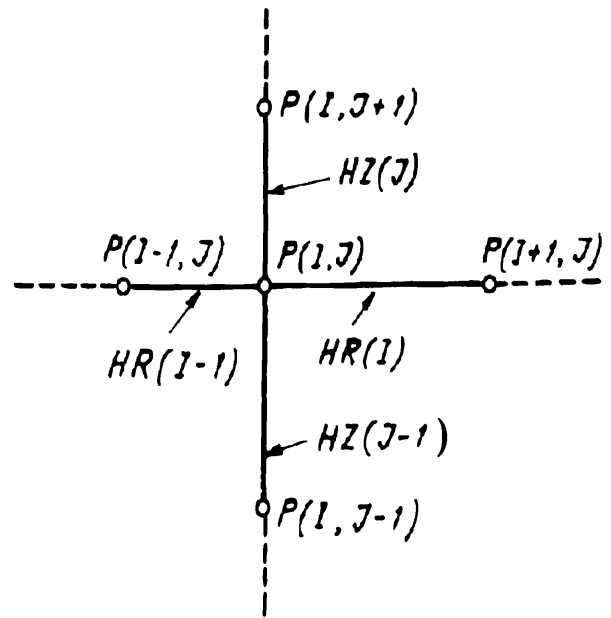


Figura 5.3: Încadrarea punctului oarecare $P(I,J)$ din cadrul domeniului considerat

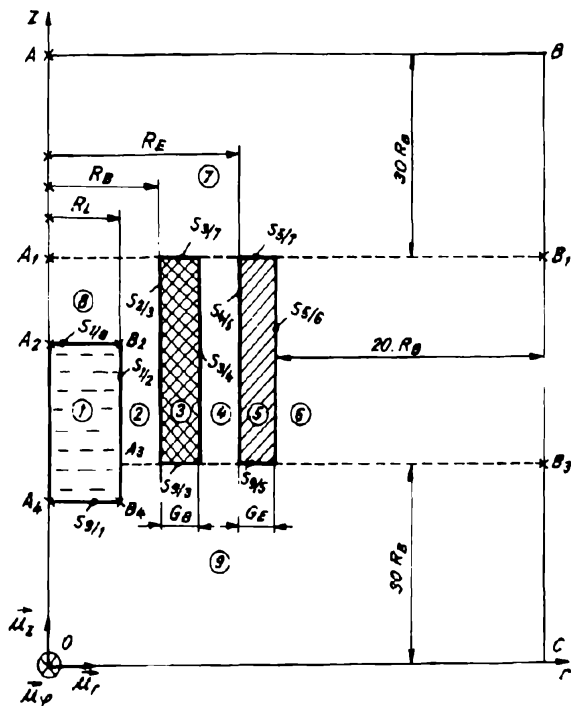


Figura 5.2: Domeniul bidimensional de analiză numerică a câmpului

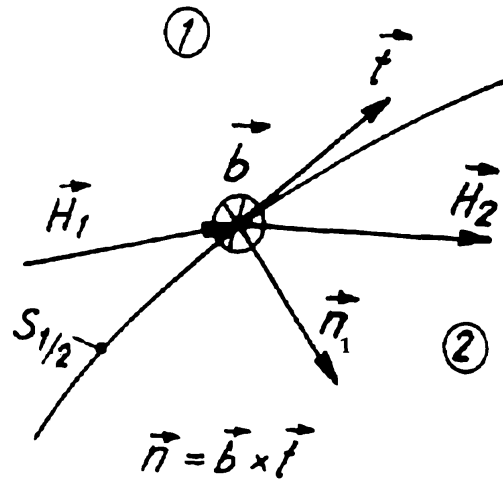


Figura 5.4: Situația vectorilor într-un punct de pe suprafața de separație dintre două medii diferite.

vectorul inducție magnetică având deci expresia generală

$$\vec{B} = \left(\frac{A}{r} + \frac{\partial A}{\partial r} \right) \cdot \vec{u}_z - \frac{\partial A}{\partial z} \cdot \vec{u}_r \quad (5.11)$$

Pentru calculul câmpului, la frontiera domeniului se impun condiții de tip Dirichlet ([71]).

Deoarece axa bobinei este o linie de câmp potențialul magnetic vector s-a luat zero, și, din motive de simetrie, este suficientă analiza numerică a câmpului doar pe o jumătate de bobină conform figurii 5.2. Pe toată frontiera domeniului din figura 5.2, considerată la distanță relativ mare în raport cu bobina, valoarea potențialului magnetic vector se consideră zero.

5.3 Condiții generale de trecere la suprafețele de separație dintre două medii diferite

În figura 5.4 se consideră două medii diferite, omogene, izotrope și fără magnetizație permanentă, separate de suprafața $S_{1/2}$ (curba notată pe figura 5.4 cu $S_{1/2}$ este intersecția suprafeței $S_{1/2}$ cu planul determinat de vectorii \vec{H}_1 și \vec{n}_1). Condiția de continuitate a componentelor normale la suprafață, a vectorului inducție magnetică

$$(B_{n_1})_1 = (B_{n_1})_2 \quad (5.12)$$

aplicată potențialului magnetic vector conduce la:

$$(A)_1 = (A)_2 \quad (5.13)$$

care reprezintă o primă condiție generală de trecere la suprafața de separație.

În expresia formei locale a legii circuitului magnetic, scrisă pentru punctele suprafeței $S_{1/2}$

$$rot_s \vec{H} = \vec{J}_s, \quad (5.14)$$

J_s poate avea în cazul general două componente

$$\vec{J}_s = J_{st} \cdot \vec{t} + J_{sb} \cdot \vec{b} \quad (5.15)$$

În această situație

$$\begin{aligned} rot_s \vec{H} &= \vec{n}_1 \times (\vec{H}_2 - \vec{H}_1) = \\ &= \vec{n}_1 \times [(H_{2t} - H_{1t}) \cdot \vec{t} + H_{2b} \cdot \vec{b} + (H_{2n} - H_{1n}) \cdot \vec{n}_1] \end{aligned} \quad (5.16)$$

iar după efectuarea produselor vectoriale

$$rot_s \vec{H} = (H_{1t} - H_{2t}) \cdot \vec{b} + H_{2b} \cdot \vec{t} \quad (5.17)$$

De obicei $\vec{J}_s = J_s \cdot \vec{b}$ și deci

$$H_{1t} - H_{2t} = J_{sb} = J_s, \quad H_{2b} = 0 \quad (5.18)$$

Trecând ecuația (5.18) în potențial magnetic vector se obține o a II-a condiție generală de trecere la suprafața de separație dintre medii

$$\frac{\vec{t} \cdot (\text{rot} \vec{A})_1}{\mu_1} - \frac{\vec{t} \cdot (\text{rot} \vec{A})_2}{\mu_2} = J_s \quad (5.19)$$

care, dacă $\vec{J}_s = 0$ devine

$$\frac{\vec{t} \cdot (\text{rot} \vec{A})_1}{\mu_1} = \frac{\vec{t} \cdot (\text{rot} \vec{A})_2}{\mu_2} \quad (5.20)$$

iar dacă $\mu_1 = \mu_2 = \mu$

$$\vec{t} \cdot (\text{rot} \vec{A})_1 - \vec{t} \cdot (\text{rot} \vec{A})_2 = \mu \cdot J_s \quad (5.21)$$

5.3.1 Condițiile de trecere pentru suprafețele cilindrice verticale ($\vec{t} = \vec{u}_z$), cu permeabilități magnetice diferite și fără curenți superficiali ($\vec{J}_s = 0$).

Pentru generalizare, referitor la suprafețele $S_{1/2}$, $S_{4/5}$ și $S_{5/6}$ din figura 5.2, notăm cu indice "st*" și respectiv "dr*" mărimile fizice corespunzătoare volumelor din stânga și respectiv dreapta suprafeței considerate.

Prima condiție rezultată din (5.13) rămâne nemodificată,

$$(A)_{st*} = (A)_{dr*} = A \quad (5.22)$$

iar a II-a rezultată din (5.20) prin înlocuirea lui \vec{t} cu \vec{u}_z și efectuarea produselor scalare (se ține cont și de (5.11)), devine:

$$\frac{1}{\mu_{st*}} \cdot \left(\frac{\partial A_{st*}}{\partial r} \right)_{r=R_x} - \frac{1}{\mu_{dr*}} \cdot \left(\frac{\partial A_{dr*}}{\partial r} \right)_{r=R_x} + \frac{A}{R_x} \cdot \left(\frac{1}{\mu_{st*}} - \frac{1}{\mu_{dr*}} \right) = 0 \quad (5.23)$$

unde:

- pentru suprafața $S_{1/2}$: $R_x = R_L$, $\mu_{st*} = \mu_L$, $\mu_{dr*} = \mu_0$;
- pentru suprafața $S_{4/5}$: $R_x = R_E$, $\mu_{st*} = \mu_0$, $\mu_{dr*} = \mu_{FE}$;
- pentru suprafața $S_{5/6}$: $R_x = R_E + G_E$, $\mu_{st*} = \mu_{FE}$, $\mu_{dr*} = \mu_0$.

Observație

Dacă $\vec{t} = \vec{u}_z$ și $\vec{n}_1 = \vec{u}_r$ (pentru suprafețele cilindrice verticale) atunci sistemul rectangular $\vec{n}_1 = \vec{b} \times \vec{t}$ devine $\vec{u}_r = \vec{u}_\varphi \times \vec{u}_z$ ceea ce corespunde unui sistem de coordonate cilindrice.

5.3.2 Condițiile de trecere pentru suprafețele cilindrice verticale ($\vec{t} = \vec{u}_z$), având aceleași permeabilități magnetice și fiind parcurse de curenți superficiali ($\vec{J}_s = J_{s\varphi} \cdot \vec{u}_\varphi = J_s \cdot \vec{u}_\varphi$).

Referitor la suprafețele $S_{2/3}$ și $S_{3/4}$, aplicând aceleași notații ca și la subparagraful precedent, obținem:

$$(A)_{st*} = (A)_{dr*} = A \quad (5.24)$$

și

$$\left(\frac{\partial A_{st^*}}{\partial r}\right)_{r=R_x} - \left(\frac{\partial A_{dr^*}}{\partial r}\right)_{r=R_x} = \mu_0 J_s \quad (5.25)$$

unde:

- pentru suprafața $S_{2/3}$: $R_x = R_B$;
- pentru suprafața $S_{3/4}$: $R_x = R_B + G_B$.

5.3.3 Condițiile de trecere pentru suprafețele plane orizontale ($\vec{t} = \vec{u}_r$), cu permeabilități magnetice diferite și fără curenți superficiali ($\vec{J}_s = 0$).

Observație.

Pentru suprafețele plane orizontale dacă $\vec{t} = \vec{u}_r$ și $\vec{b} = \vec{u}_\varphi$, atunci

$$\vec{n}_1 = -\vec{u}_z \quad (5.26)$$

Referitor la suprafețele $S_{9/1}$, $S_{1/8}$, $S_{9/5}$, și $S_{5/7}$, notăm cu indice "s*" și respectiv "j*" mărimile fizice corespunzătoare volumelor de sus și respectiv de jos față de suprafața considerată. După efectuarea calculelor obținem:

$$(A)_{s^*} = (A)_{j^*} = A \quad (5.27)$$

și, din ecuația (5.20),

$$\frac{1}{\mu_{j^*}} \cdot \left(\frac{\partial A_{j^*}}{\partial z}\right)_{z=Z_x} = \frac{1}{\mu_{s^*}} \cdot \left(\frac{\partial A_{s^*}}{\partial z}\right)_{z=Z_x} \quad (5.28)$$

unde:

- pentru suprafața $S_{9/1}$: $Z_x = OA_4$, $\mu_{j^*} = \mu_0$, $\mu_{s^*} = \mu_L$;
- pentru suprafața $S_{1/8}$: $Z_x = OA_2$, $\mu_{j^*} = \mu_L$, $\mu_{s^*} = \mu_0$;
- pentru suprafața $S_{9/5}$: $Z_x = CB_3$, $\mu_{j^*} = \mu_0$, $\mu_{s^*} = \mu_{FE}$.
- pentru suprafața $S_{5/7}$: $Z_x = CB_1$, $\mu_{j^*} = \mu_{FE}$, $\mu_{s^*} = \mu_0$.

5.3.4 Condițiile de trecere pentru suprafețele plane orizontale ($\vec{t} = \vec{u}_r$), având aceleași permeabilități magnetice, parcurse de curenți superficiali ($\vec{J}_s = J_{s\varphi} \cdot \vec{u}_\varphi = J_s \cdot \vec{u}_\varphi$).

Procedând ca la subparagraful anterior (și ținând cont și de observația respectivă), pentru suprafețele $S_{9/3}$ și $S_{3/7}$ obținem:

$$(A)_{s^*} = (A)_{j^*} = A \quad (5.29)$$

și, din ecuația (5.21),

$$\left(\frac{\partial A_{j^*}}{\partial z}\right)_{z=Z_x} - \left(\frac{\partial A_{s^*}}{\partial z}\right)_{z=Z_x} = \mu_0 J_s \quad (5.30)$$

unde:

- pentru suprafața $S_{9/1}$: $Z_x = OA_4$, $\mu_{j^*} = \mu_0$, $\mu_{s^*} = \mu_L$;
- pentru suprafața $S_{1/8}$: $Z_x = OA_2$, $\mu_{j^*} = \mu_L$, $\mu_{s^*} = \mu_0$;
- pentru suprafața $S_{9/5}$: $Z_x = CB_3$, $\mu_{j^*} = \mu_0$, $\mu_{s^*} = \mu_{FE}$.
- pentru suprafața $S_{5/7}$: $Z_x = CB_1$, $\mu_{j^*} = \mu_{FE}$, $\mu_{s^*} = \mu_0$.

5.4 Stabilirea relațiilor de calcul prin metoda diferențelor finite.

5.4.1 Relații de calcul pentru interiorul volumului parcurs de curent.

Cu notațiile:

i =intensitatea curentului care străbate spirele bobinei;

NS =numărul de spire al bobinei, și,

S_b =suprafața secțiunii bobinei,

densitatea curentului J_c este dată de relația

$$J_c = \frac{i \cdot NS}{S_b}$$

Pentru simplificarea calculelor se va considera $J_c = 1$, fapt care nu influențează valoarea inductanței calculate.

Pentru interiorul volumului parcurs de curent, ecuația vectorială a câmpului magnetic în regim staționar este dată de relația (5.5) care se poate scrie și sub forma

$$\Delta \vec{A} = -\mu_0 \vec{J}_c \quad (5.31)$$

În cazul general în coordonate cilindrice ([72])

$$\begin{aligned} \Delta \vec{A} = & \left(\Delta A_r - \frac{A_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \cdot \frac{\partial A_\varphi}{\partial \varphi} \right) \cdot \vec{u}_r + \\ & + \left(\Delta A_\varphi - \frac{A_\varphi}{r^2} + \frac{2}{r^2} \cdot \frac{\partial A_r}{\partial \varphi} \right) \cdot \vec{u}_\varphi + \\ & + \Delta A_z \cdot \vec{u}_z \end{aligned} \quad (5.32)$$

Ținând cont de (5.7)

$$A_r = 0, \quad A_z = 0, \quad \frac{\partial A_\varphi}{\partial \varphi} = 0 \quad (5.33)$$

Cu (5.33) Laplacianul lui \vec{A} devine

$$\Delta \vec{A} = \left(\Delta A_\varphi - \frac{A_\varphi}{r^2} \right) \cdot \vec{u}_\varphi \quad (5.34)$$

și cum

$$\Delta A = \frac{\partial^2 A}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial A}{\partial r} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} \quad (5.35)$$

ecuația câmpului magnetic (5.31) ajunge la forma:

$$\frac{\partial^2 A}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial A}{\partial r} - \frac{A}{r^2} + \mu_0 J_c = 0 \quad (5.36)$$

Dacă pe figura 5.3 considerăm:

$$\begin{aligned} s_1 &= HR(I) \\ s_2 &= HR(I-1) \\ s_3 &= HZ(J) \\ s_4 &= HZ(J-1) \\ A_0 &= A(I, J) \\ A_1 &= A(I+1, J) \\ A_2 &= A(I-1, J) \\ A_3 &= A(I, J+1) \\ A_4 &= A(I, J-1) \end{aligned} \quad (5.37)$$

atunci, în diferențe finite

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 A}{\partial r^2} &= 2 \cdot \frac{A_1 s_2 + A_2 s_1}{s_1 s_2 (s_1 + s_2)} - 2A_0 \cdot \frac{1}{s_1 s_2} \\ \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} &= 2 \cdot \frac{A_3 s_4 + A_4 s_3}{s_3 s_4 (s_3 + s_4)} - 2A_0 \cdot \frac{1}{s_3 s_4} \\ \frac{\partial A}{\partial r} &= \frac{A_1 s_2^2 - A_2 s_1^2}{s_1 s_2 (s_1 + s_2)} - A_0 \cdot \frac{s_2 - s_1}{s_1 s_2} \end{aligned} \quad (5.38)$$

În acest caz ecuația (5.36) în diferențe finite devine:

$$A_0 = \frac{K_1 A_1 + K_2 A_2 + K_3 A_3 + K_4 A_4 + \frac{1}{r} \cdot (K_5 A_1 - K_6 A_2) + \mu_0 J_c}{K_7 + \frac{1}{r} \cdot K_8 + \frac{1}{r^2}} \quad (5.39)$$

unde:

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{2s_2}{s_1 s_2 (s_1 + s_2)} \\ K_2 &= \frac{2s_1}{s_1 s_2 (s_1 + s_2)} \\ K_3 &= \frac{2s_4}{s_3 s_4 (s_3 + s_4)} \\ K_4 &= \frac{2s_3}{s_3 s_4 (s_3 + s_4)} \\ K_5 &= \frac{s_2^2}{s_1 s_2 (s_1 + s_2)} \\ K_6 &= \frac{s_1^2}{s_1 s_2 (s_1 + s_2)} \\ K_7 &= \frac{2s_1 s_2 + 2s_3 s_4}{s_1 s_2 s_3 s_4} \\ K_8 &= \frac{s_2 - s_1}{s_1 s_2} \end{aligned} \quad (5.40)$$

5.4.2 Relații de calcul pentru interiorul volumelor fără densitate de curent.

Folosind aceleași notații ca la subparagraful precedent și ținând cont că $J_c = 0$ obținem:

$$A_0 = \frac{K_1 A_1 + K_2 A_2 + K_3 A_3 + K_4 A_4 + \frac{1}{r} \cdot (K_5 A_1 - K_6 A_2)}{K_7 + \frac{1}{r} \cdot K_8 + \frac{1}{r^2}} \quad (5.41)$$

5.4.3 Relații de calcul pentru suprafețele cilindrice verticale

Dacă suprafața este în stânga nodurilor

$$\frac{\partial A_{dr*}}{\partial r} = \frac{A_1 - A_0}{s_1} \quad (5.42)$$

unde:

$$\begin{aligned} s_1 &= HR(I) \\ A_1 &= A(I + 1, J) \\ A_0 &= A(I, J) \end{aligned} \quad (5.43)$$

Dacă suprafața este în dreapta nodurilor

$$\frac{\partial A_{st*}}{\partial r} = \frac{A_0 - A_2}{s_2} \quad (5.44)$$

unde:

$$\begin{aligned} s_2 &= HR(I - 1) \\ A_0 &= A(I, J) \\ A_2 &= A(I - 1, J) \end{aligned} \quad (5.45)$$

Pentru suprafețele fără curenți superficiali condiția (5.23) devine:

$$\frac{1}{\mu_{st*}} \cdot \frac{A_0 - A_2}{s_2} - \frac{1}{\mu_{dr*}} \cdot \frac{A_1 - A_0}{s_1} + \frac{A_0(\mu_{dr*} - \mu_{st*})}{R_x \mu_{st*} \mu_{dr*}} = 0 \quad (5.46)$$

Notăm:

$$\begin{aligned} s_2 \cdot R_x \cdot \mu_{st*} &= C_1 \\ s_1 \cdot R_x \cdot \mu_{dr*} &= C_2 \end{aligned} \quad (5.47)$$

Cu sistemul (5.47), condiția de trecere (5.46) devine:

$$A_0 = \frac{C_1 A_1 + C_2 A_2}{s_1 s_2 \cdot (\mu_{dr*} - \mu_{st*}) + C_1 + C_2} \quad (5.48)$$

5.4.4 Relații de calcul pentru suprafețele plane orizontale

Dacă suprafața este sub noduri

$$\frac{\partial A_{s^*}}{\partial z} = \frac{A_3 - A_0}{s_3} \quad (5.49)$$

unde:

$$\begin{aligned} s_3 &= HZ(J) \\ A_3 &= A(I, J + 1) \\ A_0 &= A(I, J) \end{aligned} \quad (5.50)$$

Dacă suprafața este deasupra nodurilor

$$\frac{\partial A_{j^*}}{\partial z} = \frac{A_0 - A_4}{s_4} \quad (5.51)$$

unde:

$$\begin{aligned} s_4 &= HZ(J - 1) \\ A_0 &= A(I, J) \\ A_4 &= A(I, J - 1) \end{aligned} \quad (5.52)$$

Pentru suprafețele fără curenți superficiali condiția (5.28) devine:

$$\frac{1}{\mu_{j^*}} \cdot \frac{A_0 - A_4}{s_4} = \frac{1}{\mu_{s^*}} \cdot \frac{A_3 - A_0}{s_3} \quad (5.53)$$

Notăm:

$$\begin{aligned} s_4 \cdot \mu_{j^*} &= E_3 \\ s_3 \cdot \mu_{s^*} &= E_4 \end{aligned} \quad (5.54)$$

Cu sistemul (5.54), condiția de trecere (5.53) devine:

$$A_0 = \frac{E_3 A_3 + E_4 A_4}{E_3 + E_4} \quad (5.55)$$

5.5 Descrierea programului de calcul. Situația bobinei necranate

În partea de comentarii de la început, programul de calcul explică semnificația mărimilor de intrare și a celor calculate. Rețeaua de discretizare nu este fixă putând fi modificată prin datele de intrare (Anexa A).

În secțiunea TESTAREA REȚELEI DE DISCRETIZARE, programul își stabilește distanțele dintre punctele rețelei de discretizare, în diverse zone, în funcție de datele de intrare, atât pe orizontală cât și pe verticală. Pe orizontală, în exteriorul ecranului, rețeaua de discretizare își mărește pasul în progresie aritmetică până când distanța de la ecran la marginea dreaptă a domeniului este mai mare decât de 10 ori diametrul bobinei. Pe verticală, în exteriorul bobinei, atât în sus cât și în jos, rețeaua de discretizare își mărește

pasul în progresie aritmetică până când distanța de la capătul bobinei, cel mai apropiat de marginea domeniului, până la marginea domeniului, este mai mare decât de 15 ori diametrul bobinei. Se calculează numărul total de linii (NL) și de coloane (NC) al rețelei iar dacă acestea depășesc pe cele declarate în tablouri, programul transmite un mesaj de avertizare. În caz contrar, se afișează numărul total de linii (NL), de coloane (NC), numărul de coloane din dreapta ecranului (NR), numărul de linii din exteriorul bobinei sus sau jos (NZ) și numărul total de puncte (NL*NC).

În secțiunea GENERAREA REȚELEI DE DISCRETIZARE se atribuie numerele de identificare ale nodurilor începând din colțul din stânga jos al domeniului și dimensiunile distanțelor dintre noduri. Se creează astfel tabloul cu o dimensiune HR(I) reprezentând distanțele pe orizontală (spre dreapta) dintre coloana I și coloana I+1, și, tabloul cu o dimensiune HZ(J) reprezentând distanțele pe verticală (în sus) dintre linia J și linia J+1. Astfel punctul oarecare P(I,J) devine încadrat ca în figura 5.3. Figurile 5.5 și 5.6 prezintă un exemplu de generare a rețelei de discretizare pe orizontală și respectiv pe verticală.

Deoarece programul va utiliza și coordonatele punctelor rețelei de discretizare, secțiunea GENERAREA COORDONATELOR calculează aceste coordonate. Figurile 5.7 și 5.8 prezintă coordonatele punctelor rețelei de discretizare la care s-au referit și figurile 5.5 și 5.6. Coordonatele punctelor sunt astfel memorate în tabloul cu o dimensiune R(I) (pe orizontală) și în tabloul cu o dimensiune Z(J) (pe verticală).

Secțiunea ÎNSCRIEREA VALORILOR POTENȚIALULUI PE FRONTIERE înscrie valoarea zero în elementele tabloului cu două dimensiuni A(I,J), elemente aparținând frontierei (condiții de tip Dirichlet). Tot aici, pentru elementele de tablou A(I,J) aparținând spirelor bobinei, se înscrie o valoare inițială a potențialului magnetic vector. În același mod, în secțiunea ÎNȚIALIZAREA ANALOGICĂ, se atribuie o anumită valoare, celorlalte elemente ale tabloului A(I,J). Figurile 5.9 ... 5.11 și respectiv 5.12 ... 5.14 prezintă secțiuni pe orizontală și respectiv pe verticală prin câmpul astfel creat prin inițializare analogică pe porțiuni. Relațiile de inițializare analogică nu țin cont de prezența lichidului magnetic și a ecranului, considerând întreg domeniul omogen. Modificările câmpului datorate prezenței lichidului magnetic și ecranului feromagnetic rezultă în urma calculului iterativ din secțiunea CALCULUL ITERATIV PRIN MDF (metoda diferențelor finite).

Această secțiune a programului este rulată cel mai des, variabila de indexare care ține cont de numărul rulașului pentru o anumită poziție a lichidului magnetic fiind IC1. Coloana pe care se testează eroarea de iterație este stabilită de variabila IAZ pe primul strat de puncte aparținând bobinei, iar linia pe care se testează eroarea de iterație este stabilită de variabila JAR pe stratul de puncte de la suprafața lichidului magnetic. Prin rulașe succesive, s-a constatat că valoarea potențialului magnetic vector variază cel mai mult de la o iterație la alta și cu poziția lichidului magnetic în aceste două straturi de puncte. Valorile lui A(I,J) în aceste straturi de puncte sunt memorate în tablourile AR(K) (pentru JAR) și AZ(K) (pentru IAZ) și vor fi comparate cu valorile potențialului aceluiași puncte de la iterația următoare. Mai departe programul baleiază punct cu punct întreg domeniul (exceptând frontierele unde potențialul rămâne fix). Pentru fiecare punct în parte, calculul potențialului său în funcție de potențialele punctelor din vecinătate, se face conform relațiilor stabilite în paragraful 5.4 După ce este baleiat întreg domeniul, în secțiunea CALCULUL ERORII RELATIVE se calculează evoluțiile relative ale ultimei iterații în straturile JAR și IAZ, și, dacă aceste evoluții sunt mai mari decât o valoare prescrisă prin datele de intrare, ciclul se reia.

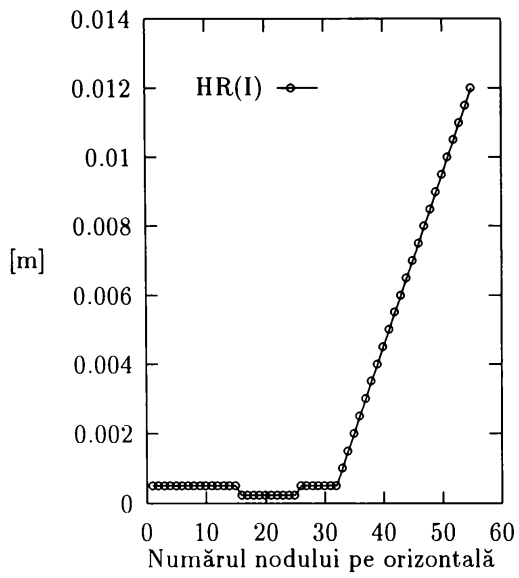


Figura 5.5: Exemplu de generare a rețelei de discretizare pe orizontală

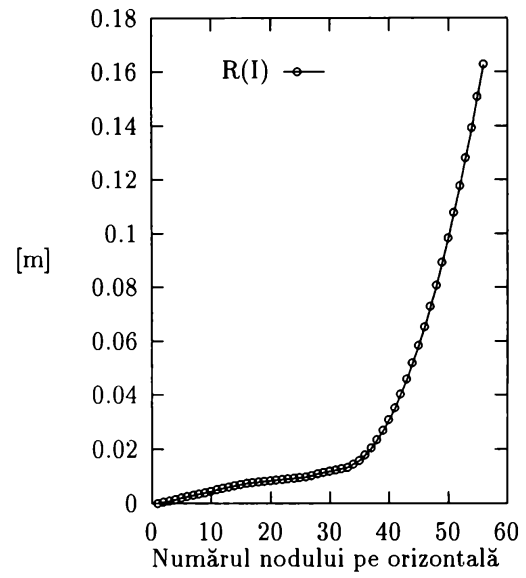


Figura 5.7: Evoluția absciselor punctelor rețelei de discretizare

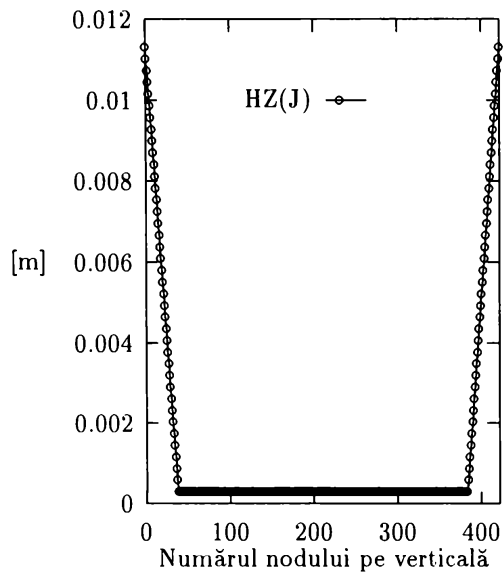


Figura 5.6: Exemplu de generare a rețelei de discretizare pe verticală

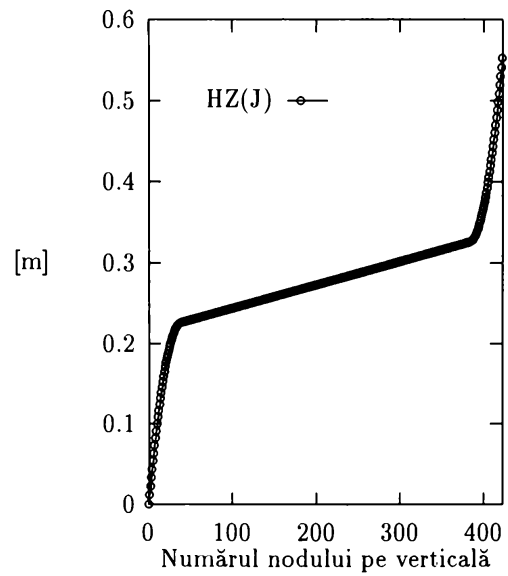


Figura 5.8: Evoluția ordonatelor punctelor rețelei de discretizare

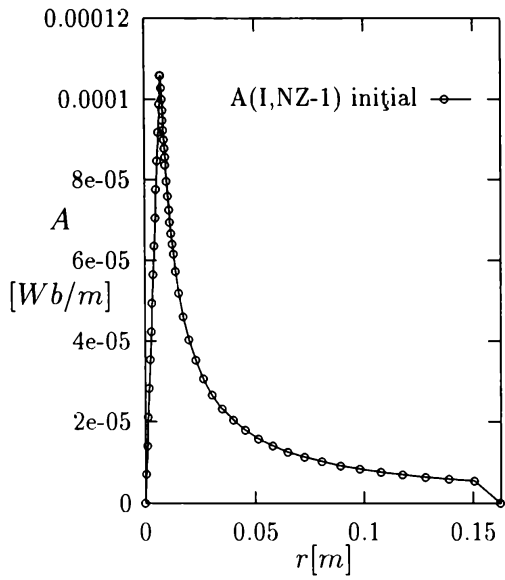


Figura 5.9: Secțiune pe orizontală prin câmpul inițial A , pe linia NZ-1 (sub bobină).

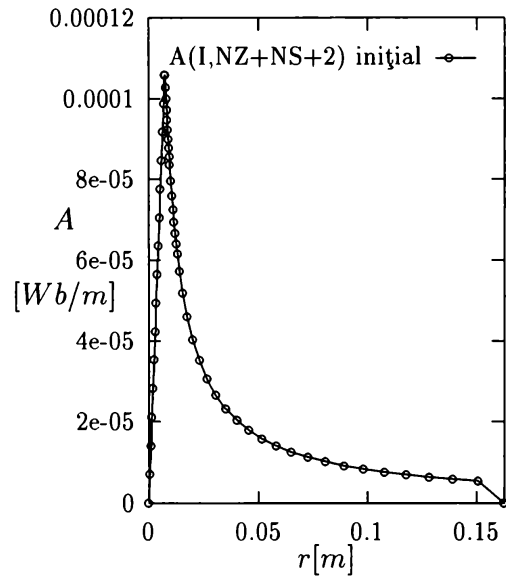


Figura 5.11: Secțiune pe orizontală prin câmpul inițial A , pe linia NZ+NS+2 (deasupra bobinei).

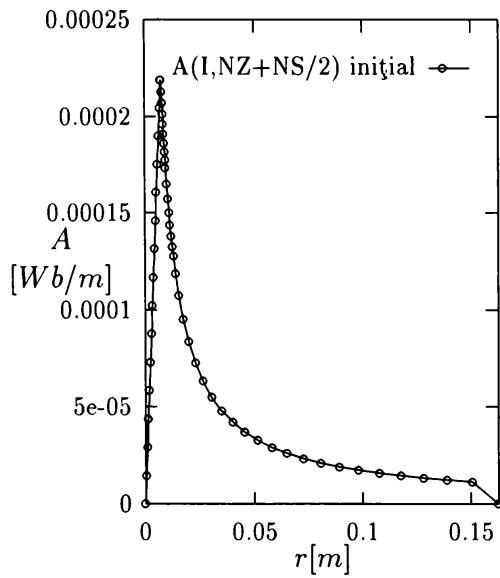


Figura 5.10: Secțiune pe orizontală prin câmpul inițial A , pe linia NZ+NS/2 (la jumătate din lungimea bobinei).

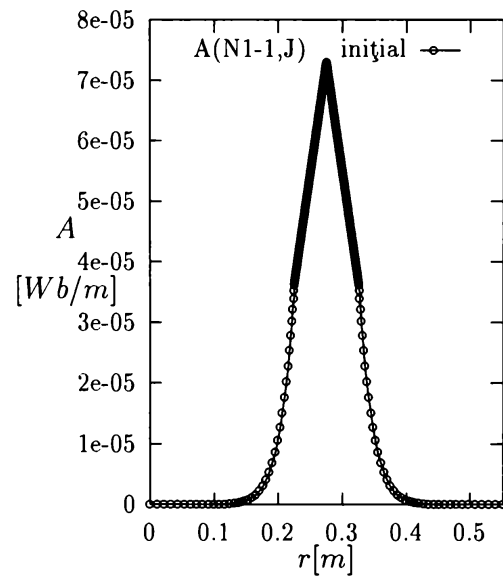


Figura 5.12: Secțiune pe verticală prin câmpul inițial A , pe coloana N1-1 (prin lichid magnetic).

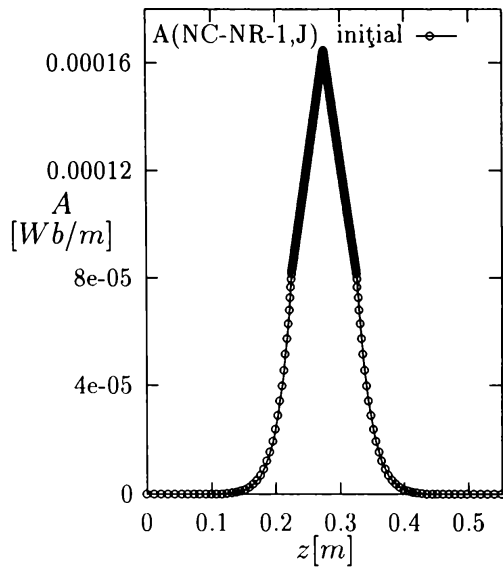


Figura 5.13: Secțiune pe verticală prin câmpul inițial A, pe coloana NC-NR-1 (prin ecran).

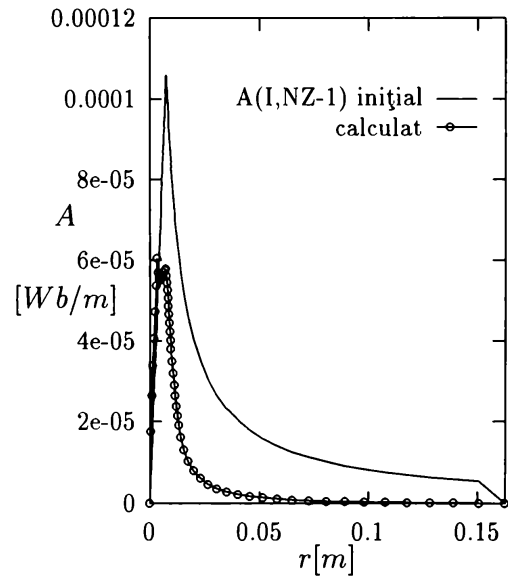


Figura 5.15: Secțiune pe orizontală pe linia NZ-1 prin câmpul A calculat iterativ (sub bobină).

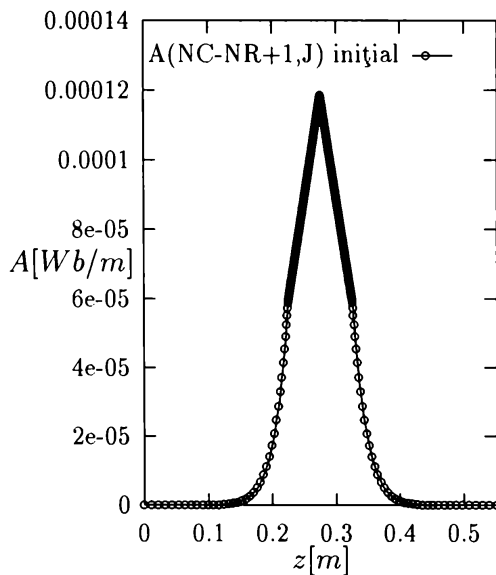


Figura 5.14: Secțiune pe verticală prin câmpul inițial A, pe coloana NC-NR+1 (prin dreapta ecranului).

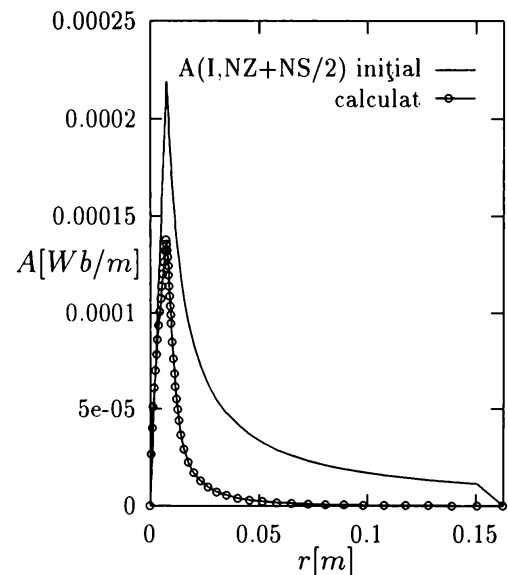


Figura 5.16: Secțiune pe orizontală pe linia NZ+NS/2 prin câmpul A calculat iterativ (la jumătate din lungimea bobinei).

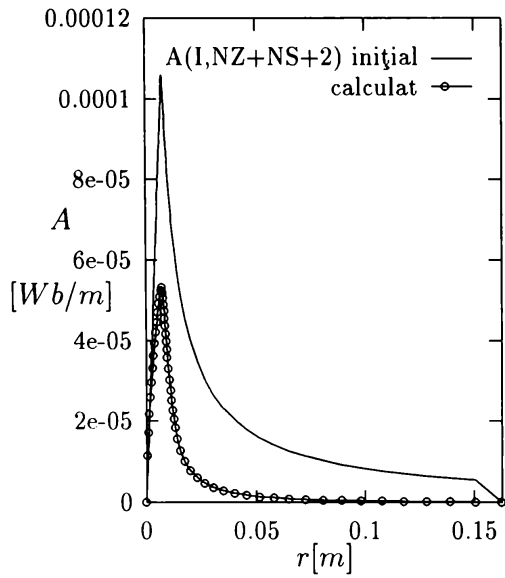


Figura 5.17: Secțiune pe orizontală pe linia NZ+NS+2 prin câmpul A calculat iterativ (deasupra bobinei).

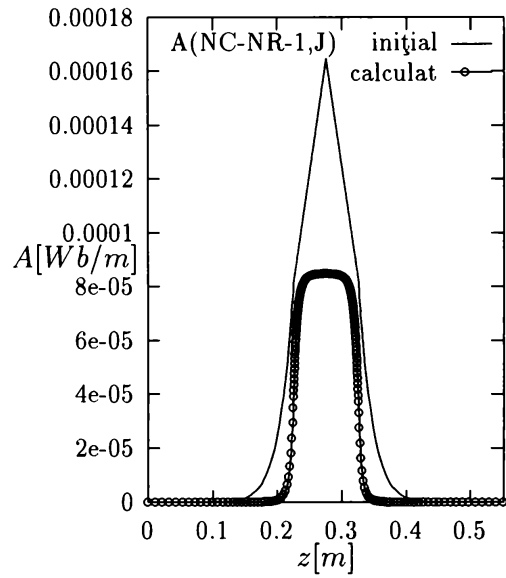


Figura 5.19: Secțiune pe verticală pe coloana NC-NR-1 prin câmpul A calculat iterativ (prin ecran).

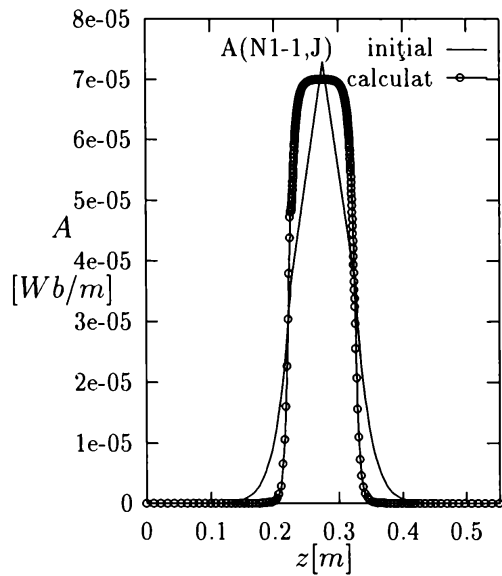


Figura 5.18: Secțiune pe verticală pe coloana N1-1 prin câmpul A calculat iterativ (prin lichid magnetic).

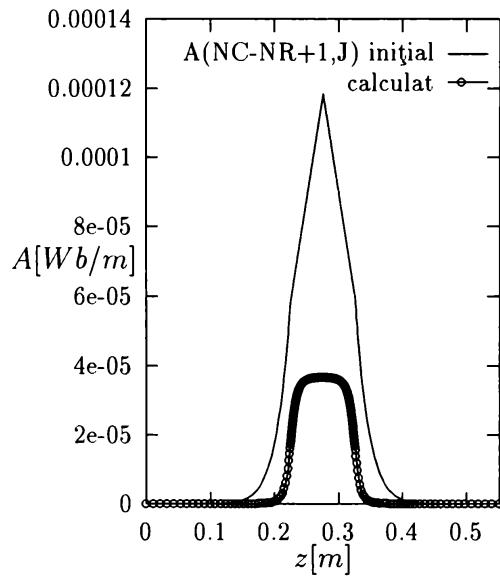


Figura 5.20: Secțiune pe verticală pe coloana NC-NR+1 prin câmpul A calculat iterativ (prin dreapta ecranului).

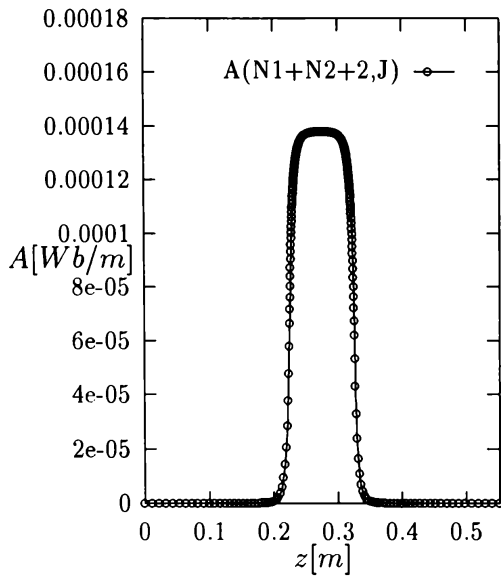


Figura 5.21: Secțiune pe verticală prin câmpul A calculat iterativ (primul strat interior de puncte aparținând bobinei).

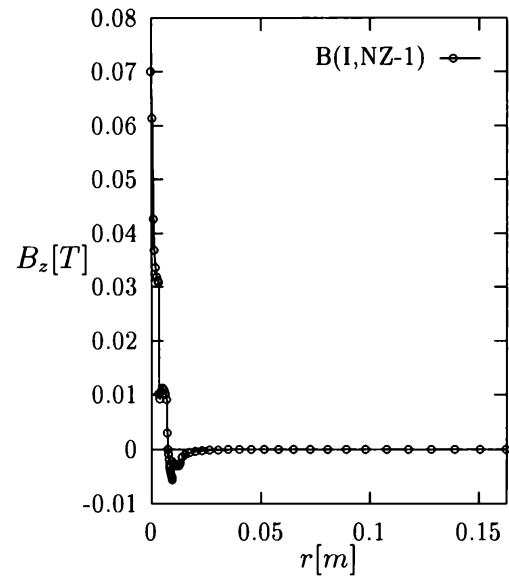


Figura 5.23: Secțiune pe orizontală pe linia NZ-1 prin câmpul B (sub bobină).

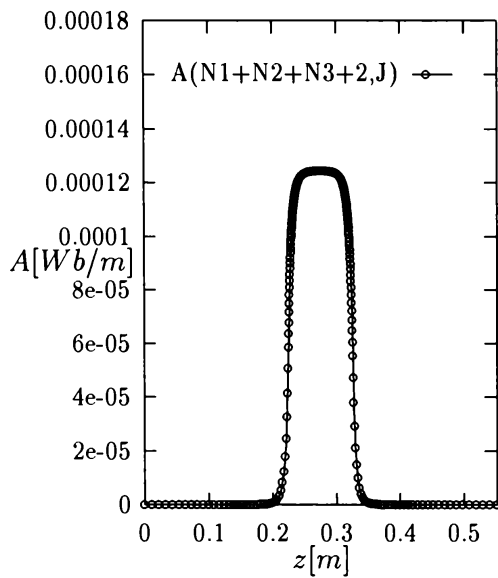


Figura 5.22: Secțiune pe verticală prin câmpul A calculat iterativ (ultimul strat exterior de puncte aparținând bobinei).

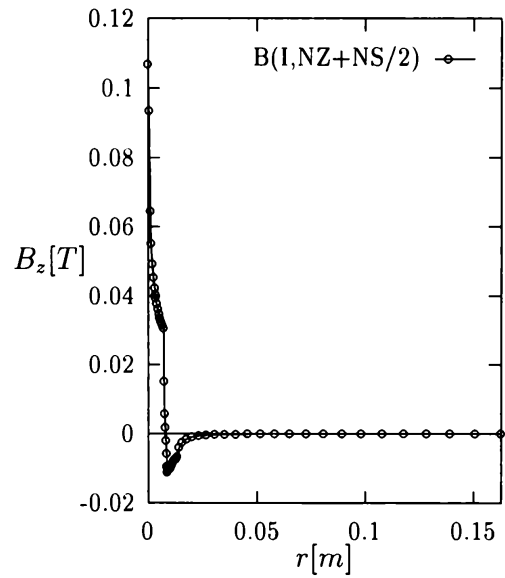


Figura 5.24: Secțiune pe orizontală pe linia NZ+NS/2 prin câmpul B (la jumătate din lungimea bobinei).

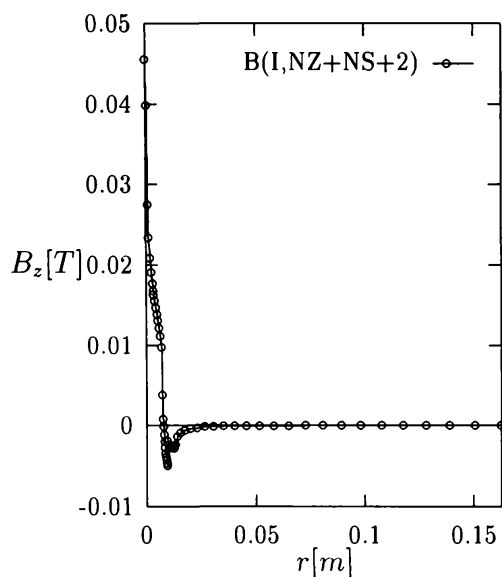


Figura 5.25: Secțiune pe orizontală pe linia NZ+NS+2 prin câmpul B (deasupra bobinei).

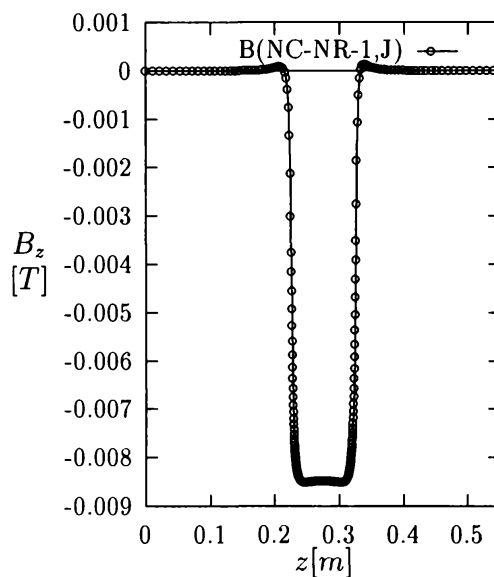


Figura 5.27: Secțiune pe verticală pe coloana NC-NR-1, prin câmpul B (prin ecran).

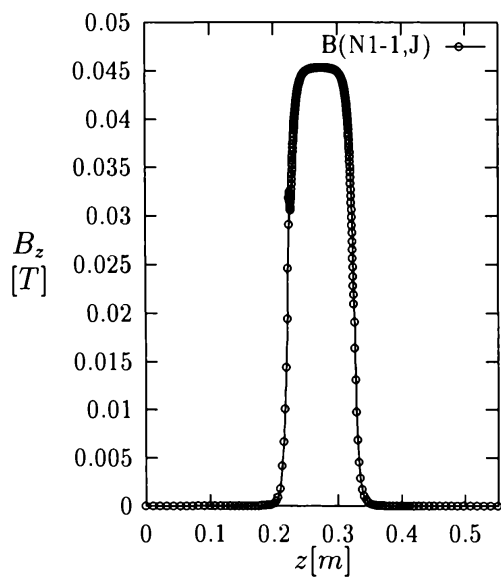


Figura 5.26: Secțiune pe verticală pe coloana N1-1 prin câmpul B (prin lichid magnetic).

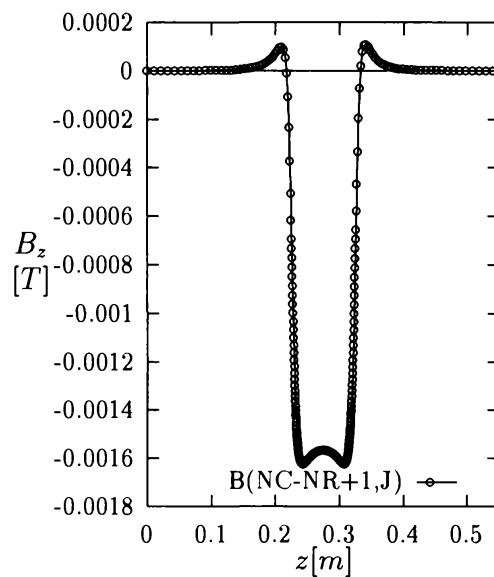


Figura 5.28: Secțiune pe verticală pe coloana NC-NR+1, prin câmpul B (prin dreapta ecranului).

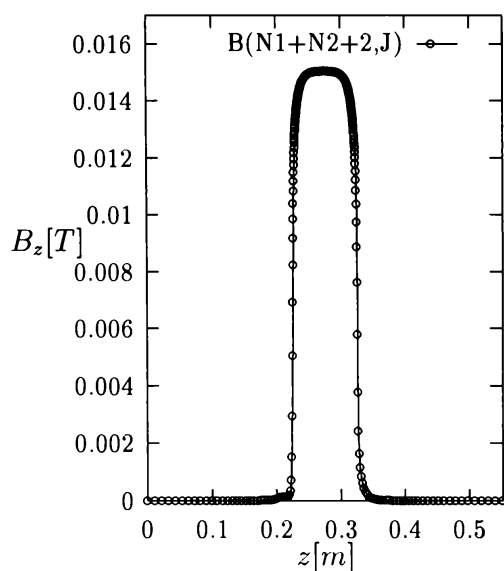


Figura 5.29: Secțiune pe verticală pe coloana primului strat de puncte interior aparținând bobinei, prin câmpul B.

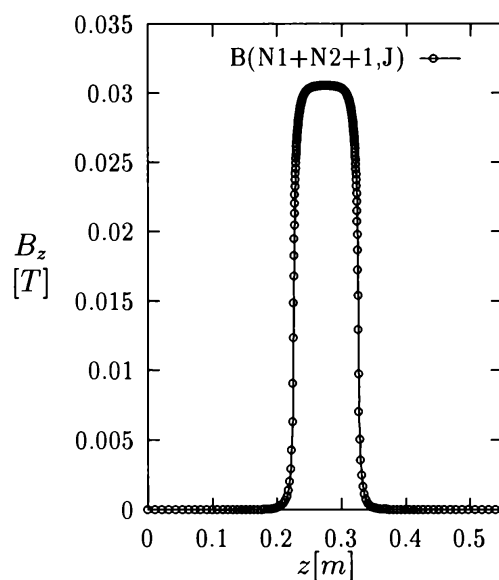


Figura 5.31: Secțiune pe verticală pe coloana ultimului strat de puncte din interiorul bobinei, prin câmpul B.

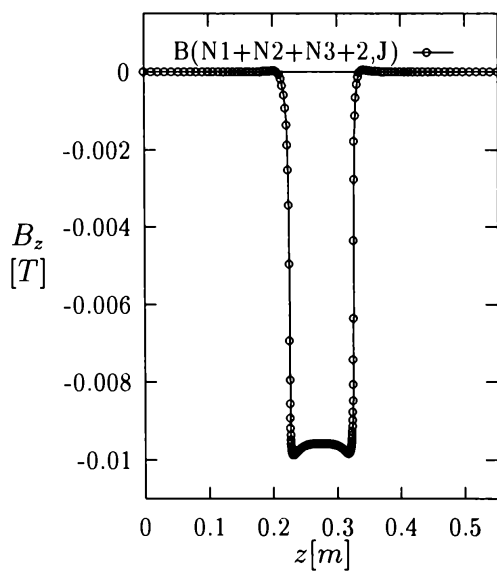


Figura 5.30: Secțiune pe verticală pe coloana ultimului strat de puncte exterior aparținând bobinei, prin câmpul B.

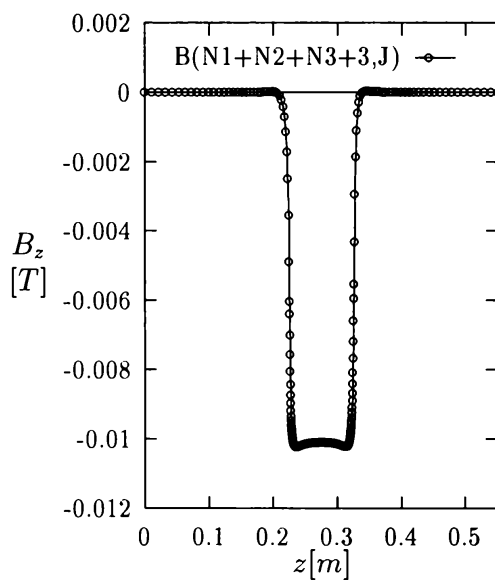


Figura 5.32: Secțiune pe verticală pe coloana primului strat de puncte din exteriorul bobinei, prin câmpul B.

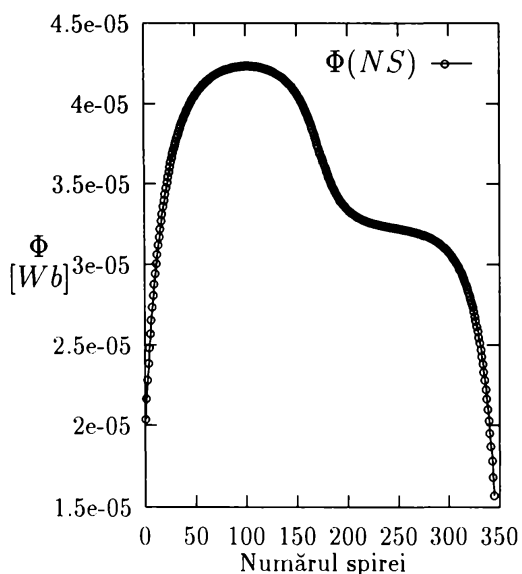


Figura 5.33: Variația fluxului inducției magnetice prin spirele bobinei.

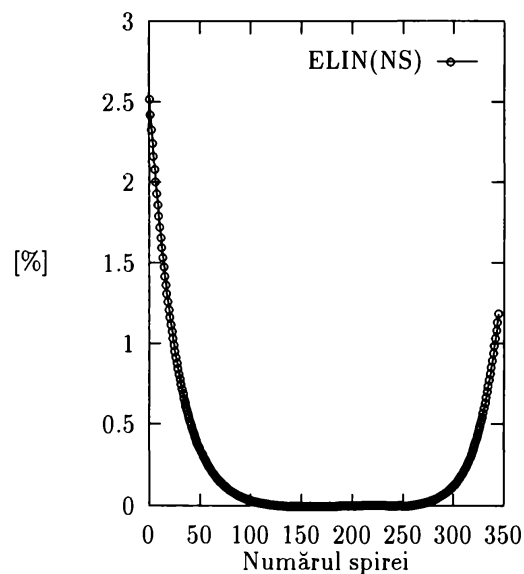


Figura 5.35: Variația erorii relative de neliniaritate a curbei din fig. anterioară.

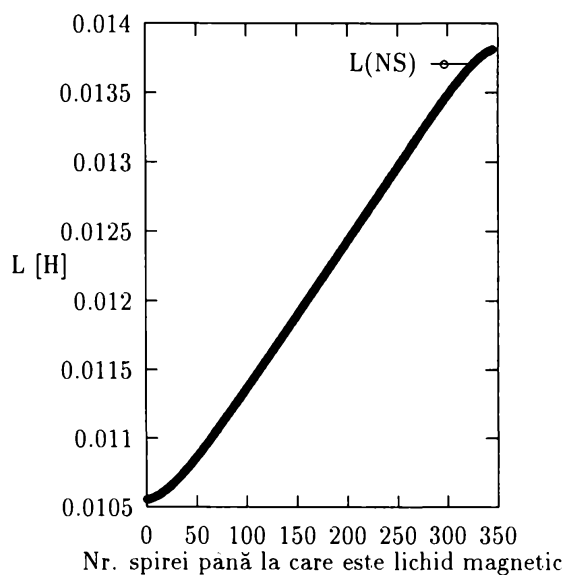


Figura 5.34: Variația inductanței bobinei în funcție de nivelul lichidului magnetic din interiorul său.

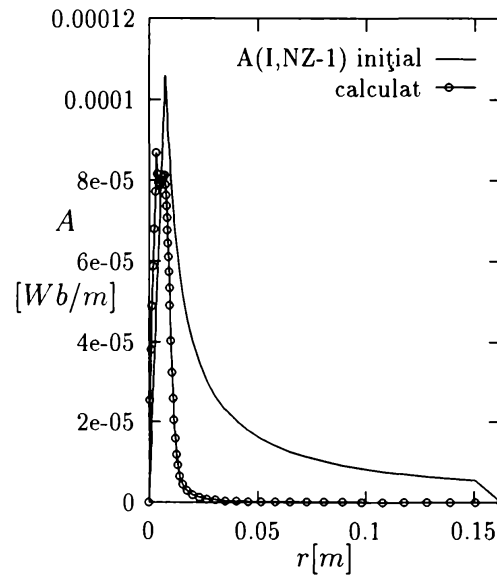


Figura 5.36: Secțiune pe orizontală pe linia NZ-1 prin câmpul A calculat iterativ (sub bobină) (bobină ecranată).

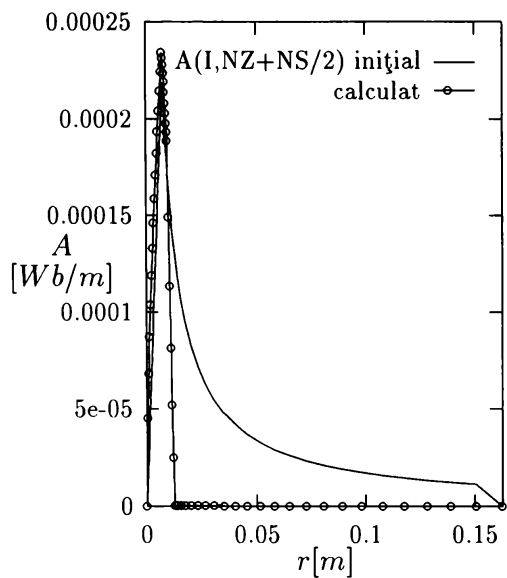


Figura 5.37: Secțiune pe orizontală pe linia NZ+NS/2 prin câmpul A calculat iterativ (la jumătate din lungimea bobinei) (bobină ecranată).

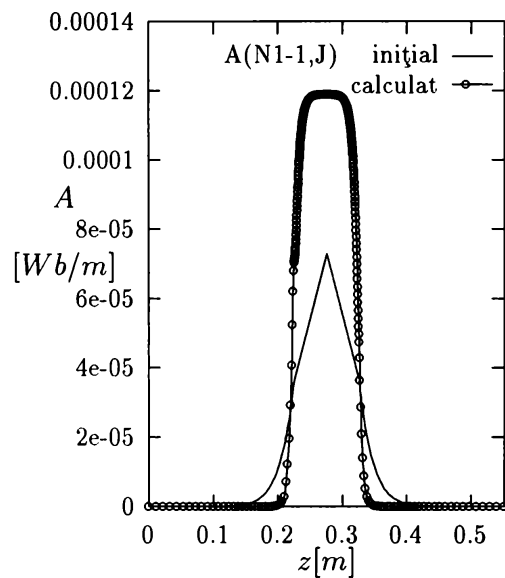


Figura 5.39: Secțiune pe verticală pe coloana N1-1 prin câmpul A calculat iterativ (prin lichid magnetic) (bobină ecranată).

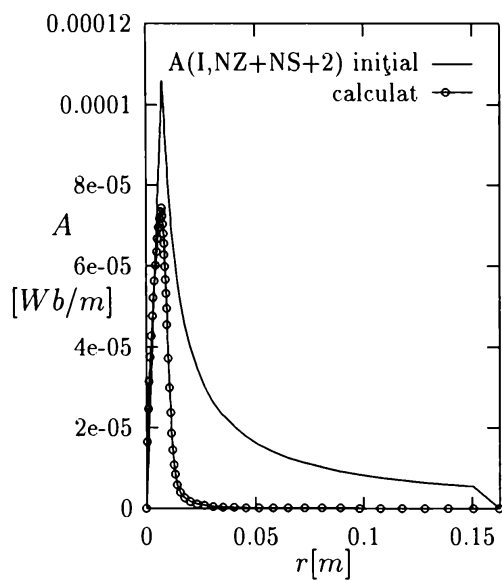


Figura 5.38: Secțiune pe orizontală pe linia NZ+NS+2 prin câmpul A calculat iterativ (deasupra bobinei) (bobină ecranată).

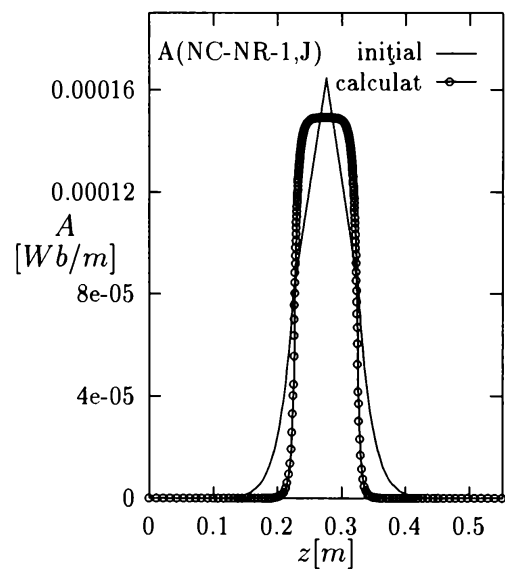


Figura 5.40: Secțiune pe verticală pe coloana NC-NR-1 prin câmpul A calculat iterativ (prin ecran) (bobină ecranată).

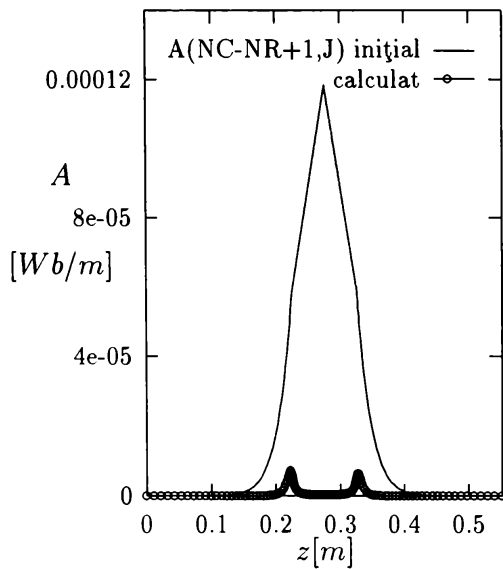


Figura 5.41: Secțiune pe verticală pe coloana NC-NR+1 prin câmpul A calculat iterativ (prin dreapta ecranului) (bobină ecranată).

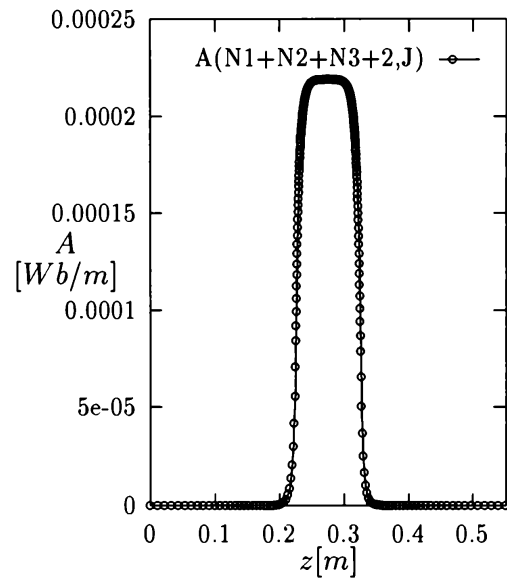


Figura 5.43: Secțiune pe verticală prin câmpul A calculat iterativ (ultimul strat exterior de puncte aparținând bobinei) (bobină ecranată).

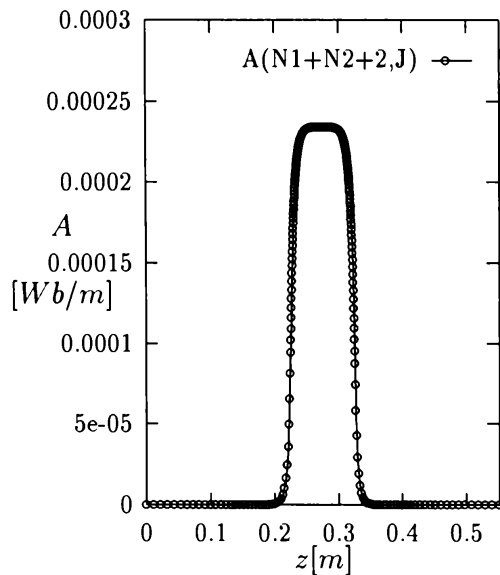


Figura 5.42: Secțiune pe verticală prin câmpul A calculat iterativ (primul strat interior de puncte aparținând bobinei) (bobină ecranată).

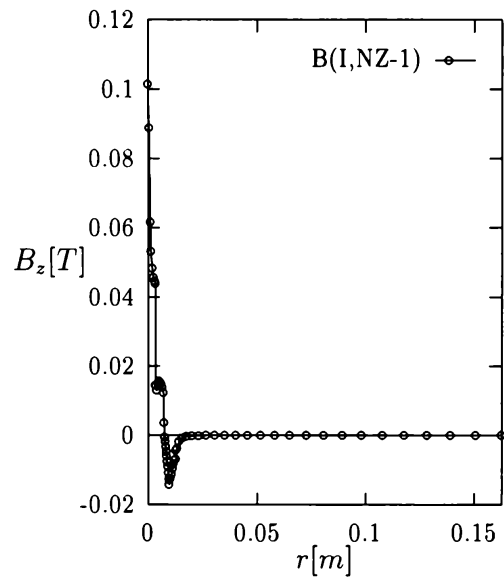


Figura 5.44: Secțiune pe orizontală pe linia NZ-1 prin câmpul B (sub bobină) (bobină ecranată).

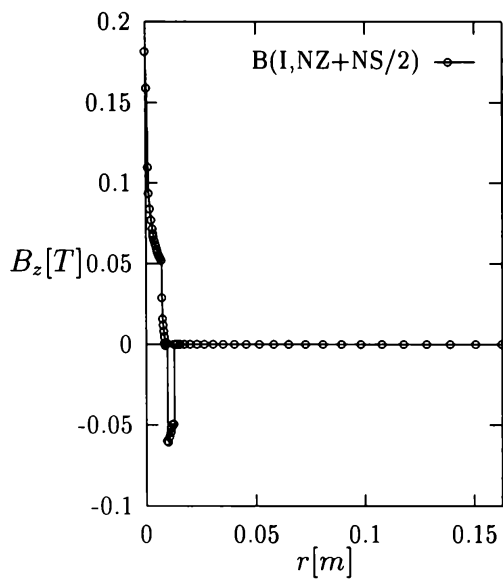


Figura 5.45: Secțiune pe orizontală pe linia NZ+NS/2 prin câmpul B (la jumătate din lungimea bobinei) (bobină ecranată).

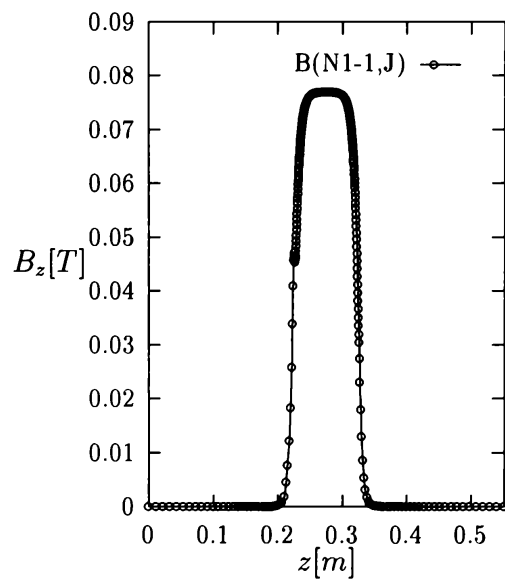


Figura 5.47: Secțiune pe verticală pe coloana N1-1 prin câmpul B (prin lichid magnetic) (bobină ecranată).

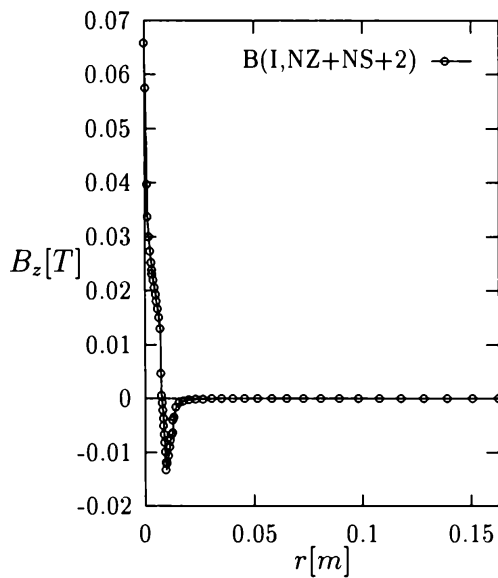


Figura 5.46: Secțiune pe orizontală pe linia NZ+NS+2 prin câmpul B (deasupra bobinei) (bobină ecranată).

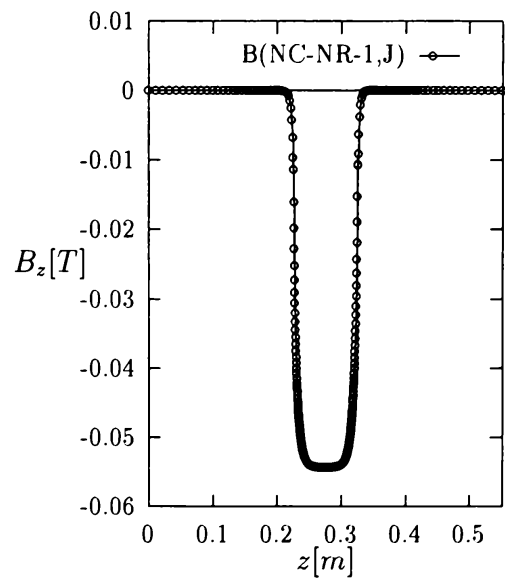


Figura 5.48: Secțiune pe verticală pe coloana NC-NR-1, prin câmpul B (prin ecran) (bobină ecranată).

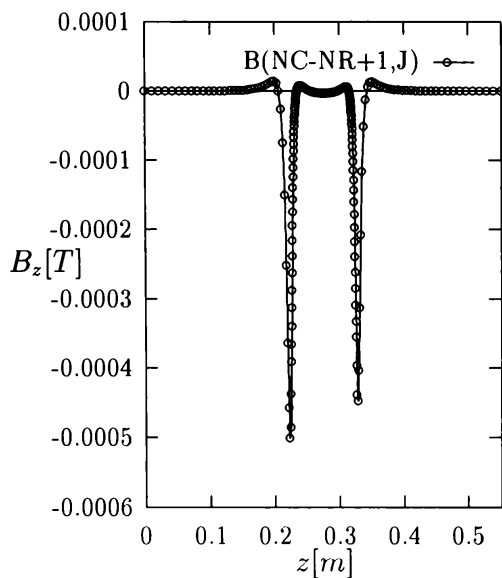


Figura 5.49: Secțiune pe verticală pe coloana NC-NR+1, prin câmpul B (prin dreapta ecranului) (bobină ecranată).

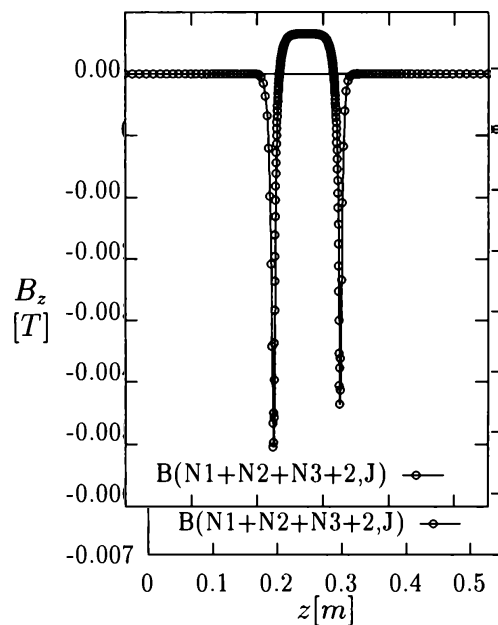


Figura 5.51: Secțiune pe verticală pe coloana ultimului strat de puncte exterior aparținând bobinei, prin câmpul B (bobină ecranată).

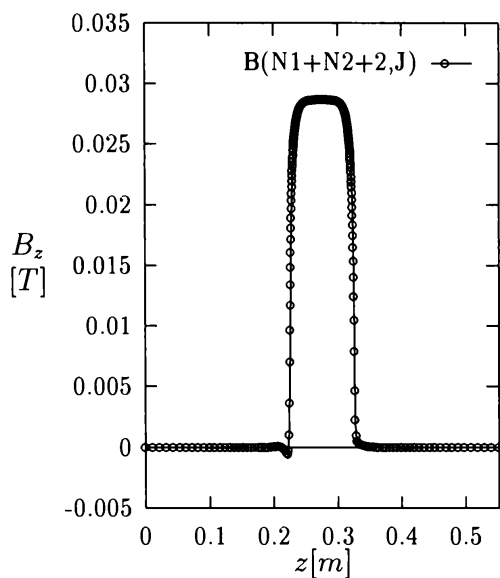


Figura 5.50: Secțiune pe verticală pe coloana primului strat de puncte interior aparținând bobinei, prin câmpul B (bobină ecranată).

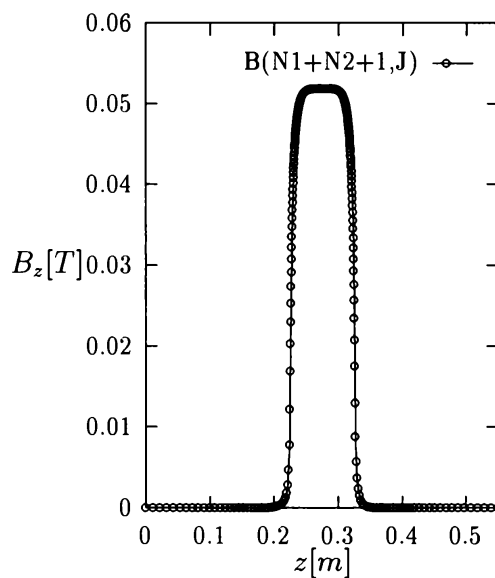


Figura 5.52: Secțiune pe verticală pe coloana ultimului strat de puncte din interiorul bobinei (bobină ecranată).

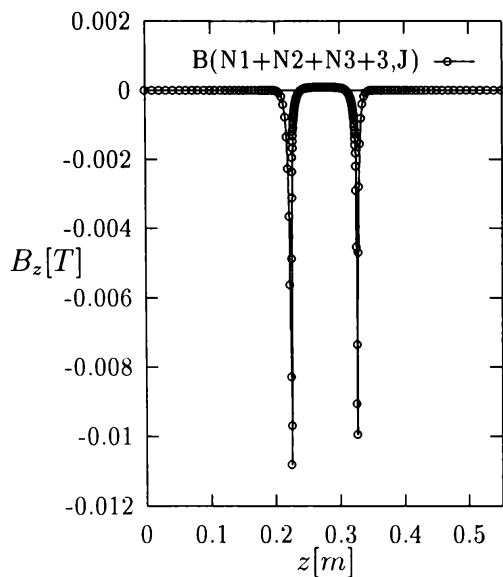


Figura 5.53: Secțiune pe verticală pe coloana primului strat de puncte din exteriorul bobinei (bobină ecranată).

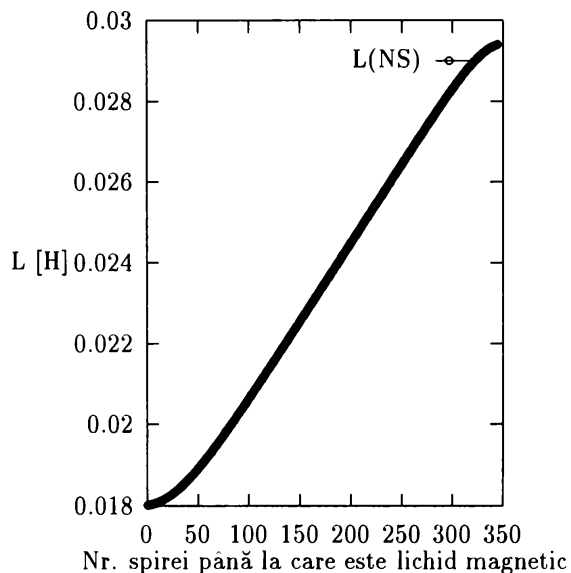


Figura 5.55: Variația inductanței bobinei în funcție de nivelul lichidului magnetic din interiorul său (bobină ecranată).

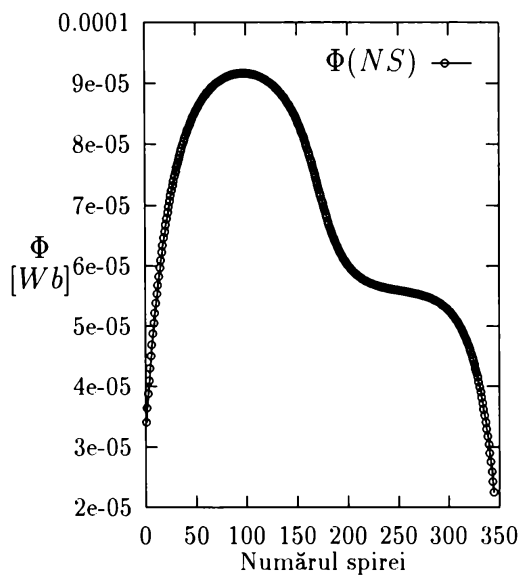


Figura 5.54: Variația fluxului inducției magnetice prin spirele bobinei (bobină ecranată).

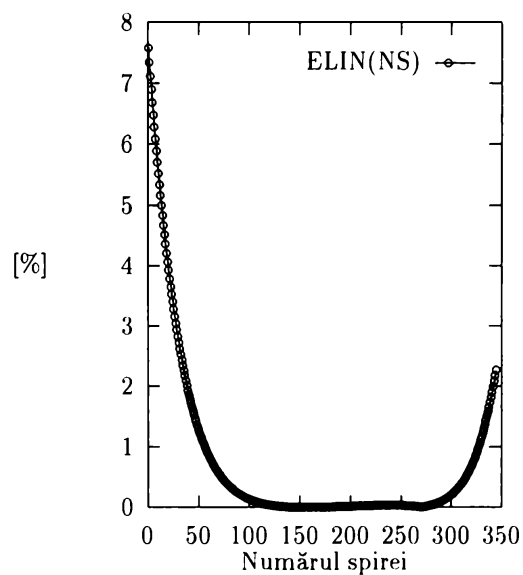


Figura 5.56: Variația erorii relative de neliniaritate a curbei din fig. anterioară (bobină ecranată).

Programul afișează în permanență poziția lichidului magnetic (SPIRA NR.), numărul iterației la poziția respectivă (ITERATIA) și eroarea relativă maximă a potențialelor în straturile IAZ și JAR (EROARE RELATIVA). Figurile 5.15 ... 5.17 și respectiv 5.18 ... 5.22, prezintă secțiuni pe orizontală și respectiv pe verticală prin câmpul calculat iterativ (cu linie nepunctată sunt reprezentate valorile inițiale ale potențialelor).

În secțiunea CALCULUL COMPONENTEI AXIALE A INDUCȚIEI MAGNETICE, se baleiază din nou întreg domeniul, dar pe porțiuni, calculându-se în fiecare punct componenta axială a vectorului inducție magnetică. Pentru punctele de pe suprafețele de discontinuitate cilindrice se obțin două valori diferite ale componentei axiale a vectorului inducție magnetică, aceasta putând prezenta salturi. Figurile 5.23 ... 5.25 și respectiv 5.26 ... 5.32 prezintă secțiuni pe orizontală și respectiv pe verticală prin tabloul cu două dimensiuni $B(I,J)$ reprezentând valorile componentei axiale a vectorului inducție magnetică.

În secțiunea CALCULUL INDUCTANȚEI BOBINEI, se calculează inițial fluxul inducției magnetice prin suprafața spirei ($FI(J)$). Figura 5.33 prezintă variația acestui flux pentru cazul când lichidul magnetic se află la jumătatea bobinei. Aceste fluxuri fiind cunoscute se calculează inductanța bobinei în funcție de nivelul lichidului magnetic din interiorul său. Figura 5.34 prezintă această variație a inductanței bobinei. Curba din figura 5.34 poate fi aproximată cu dreapta tangentă ei care trece prin punctul de abscisă $NS/2$. Secțiunea CALCULUL ERORII RELATIVE DE NELINIARITATE, calculează tangenta acestei drepte (TAN) și eroarea relativă de neliniaritate a curbei din figura 5.34. Evoluția acestei erori în funcție de nivelul lichidului magnetic este prezentată în figura 5.35.

5.6 Situația bobinei ecranate

În graficele următoare (Fig. 5.36 ... 5.56) se prezintă situația câmpului magnetic al bobinei, în aceleași condiții ca și până acum, dar în prezența unui ecran feromagnetic cu permeabilitate magnetică relativă 1000. Denumirile graficelor reprezentate sunt eceleași.

Deși, așa cum rezultă din figuri, condițiile inițiale de plecare sunt identice cu cele de la rulajul anterior, datorită prezenței ecranului, în urma calculului iterativ, forma câmpului magnetic se modifică în totalitate în exteriorul bobinei și mult mai puțin în interiorul ei. -Totuși modificările câmpului din interiorul bobinei influențează inductivitatea ei și forma de variație a inductivității cu variația nivelului lichidului magnetic. Aceste abateri sunt de ordinul procentelor și nu pot fi neglijate în cazul traductoarelor de precizie.

6

Verificări experimentale asupra bobinei

6.1 Principiul de verificare

Verificarea experimentală a calculelor efectuate s-a făcut pe bobinele prezentate în figurile 6.1 și 6.2. Pentru modificarea controlată a nivelului lichidului magnetic din interiorul bobinelor se folosește principiul original ilustrat în figura 6.3. Pe baza comparării rezultatelor experimentale obținute de autor cu rezultatele obținute prin calcul numeric, s-a putut stabili o formulă originală pentru corecția susceptivității magnetice inițiale a lichidului magnetic, măsurată experimental prin metode cunoscute ([74]). Pentru reprezentarea grafică a rezultatelor experimentale s-au realizat programe de reprezentare grafică originale.

Principiul de modificare controlată a nivelului lichidului magnetic din interiorul bobinelor implică prezența a două tuburi (de sticlă), verticale, paralele, de secțiune interioară calibrată (S) care comunică la partea de jos printr-un tub flexibil suficient de lung încât să permită mișcarea relativă a celor două tuburi de sticlă în limitele dorite. În interiorul acestui sistem U se află lichid magnetic până la o anumită înălțime a tuburilor de sticlă ([73]).

Fie:

$V_1 = S \cdot h_1$ — volumul de lichid magnetic aflat în tubul de sticlă din dreapta;

$V_2 = S \cdot h_2$ — volumul de lichid magnetic aflat în tubul de sticlă din stânga;

$V_f = \text{constant}$ — volumul de lichid magnetic aflat în tubul flexibil.

Presupunând tubul din dreapta fix și deplasând pe verticală tubul din stânga avem următoarele relații:

$$V_1 + V_2 + V_f = K \quad (\text{constant}) \quad (6.1)$$

$$S \cdot h_1 + S \cdot h_2 = K - V_f \quad (6.2)$$

deci:

$$h_1 + h_2 = K' \quad (6.3)$$

Dacă tubul din stânga se deplasează pe verticală, înălțimile coloanelor de lichid magnetic se modifică devenind h'_1 și h'_2 și deoarece volumul de lichid magnetic este constant,

$$h'_1 + h'_2 = h_1 + h_2 = K' \quad (6.4)$$

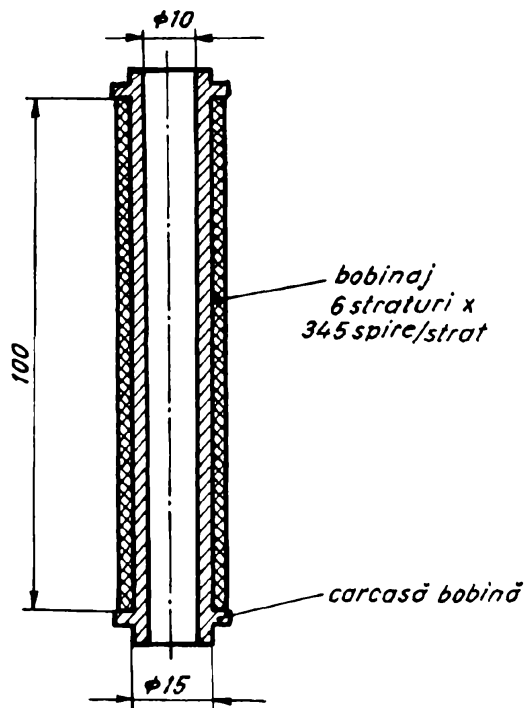


Figura 6.1: Dimensiunile bobinei mici pe care s-au făcut verificările experimentale

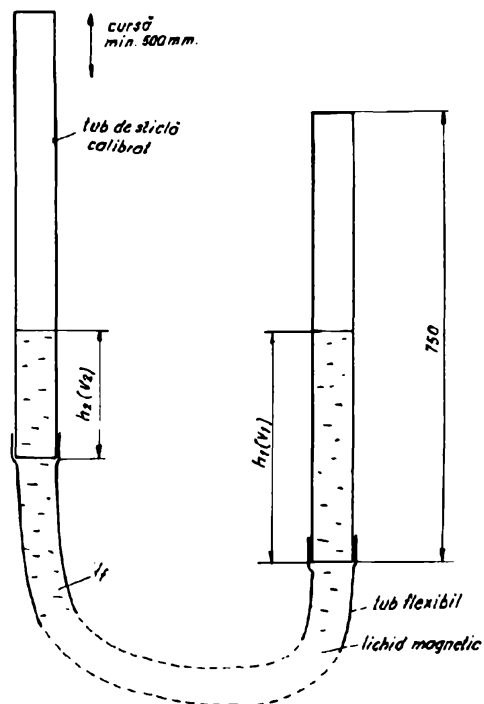


Figura 6.3: Principiul de control al nivelului lichidului magnetic

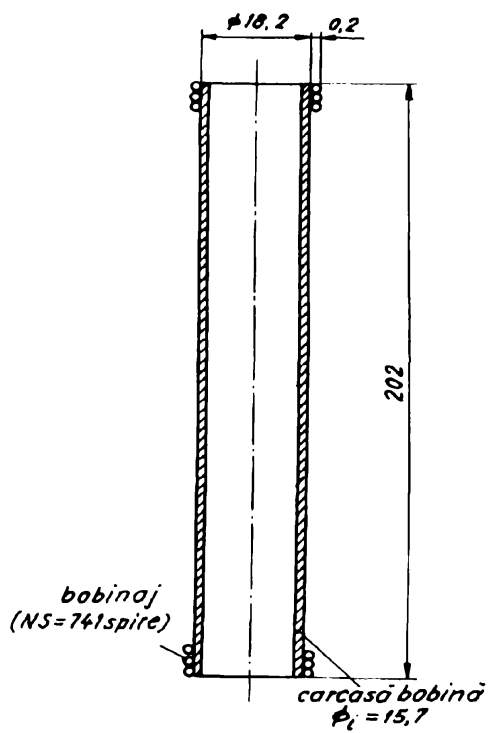


Figura 6.2: Dimensiunile bobinei mari pe care s-au făcut verificările experimentale

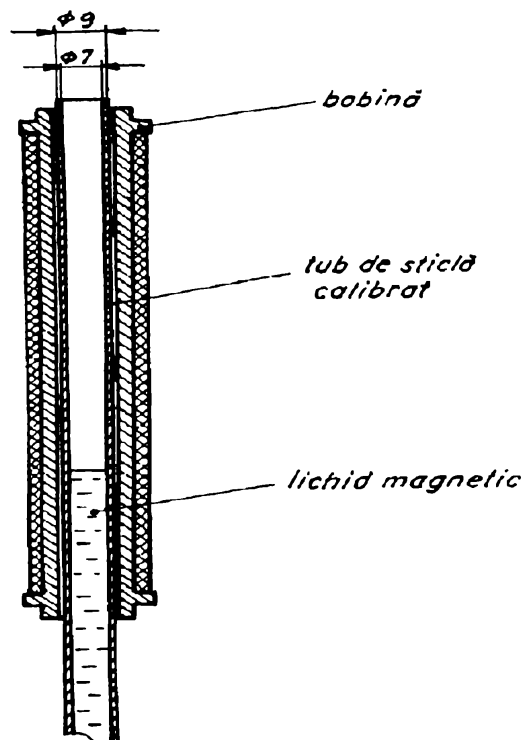


Figura 6.4: Amplasarea bobinei electrice peste tubul de sticlă.

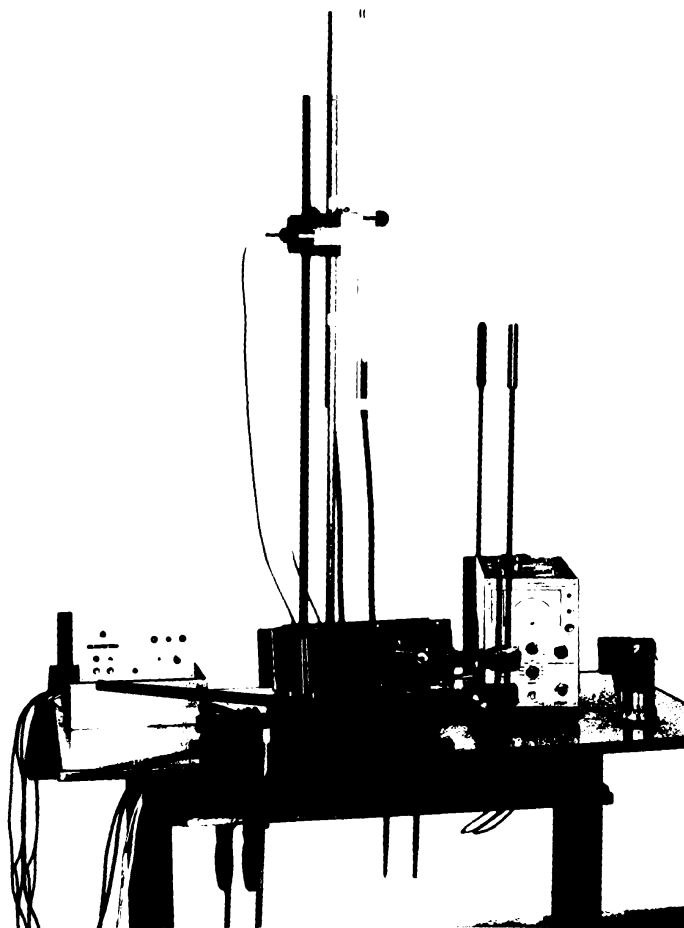


Figura 6.5: Instalația experimentală pentru bobina din figura 6.1

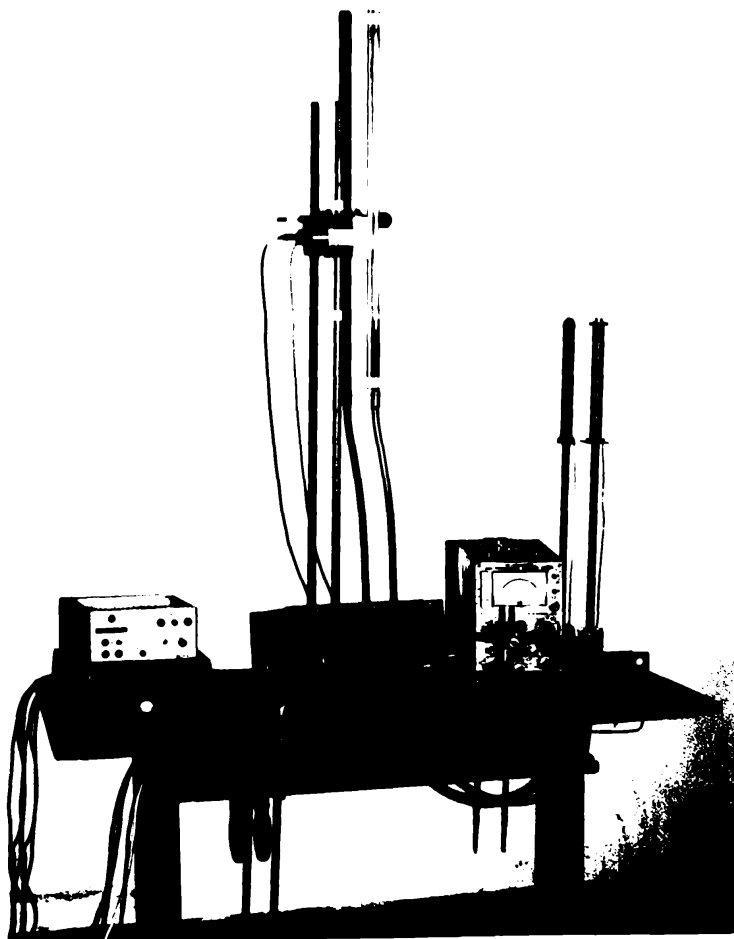


Figura 6.6: Instalația experimentală pentru bobina din figura 6.2

Dacă tubul din stânga urcă cu lungimea Δh , notând cu Δx nivelul cu care se ridică lichidul magnetic în tubul din dreapta avem relațiile:

$$h'_1 = h_1 + \Delta x \quad (6.5)$$

$$h'_2 = h_2 - \Delta h + \Delta x \quad (6.6)$$

$$K' = h'_1 + h'_2 = h_1 + h_2 = h_1 + h_2 + 2\Delta x - \Delta h \quad (6.7)$$

Din ultima egalitate

$$\Delta x = \frac{\Delta h}{2} \quad (6.8)$$

Deci nivelul lichidului magnetic din tubul din dreapta se modifică cu jumătate din lungimea deplasării pe verticală a tubului din stânga. În concluzie, chiar dacă tubul din dreapta este acoperit de exemplu de bobina din figura 6.1 (situație ilustrată în figura 6.4), putem cunoaște nivelul lichidului magnetic din interiorul său controlând poziția tubului din stânga.

6.2 Instalația experimentală

Instalațiile utilizate pentru măsurătorile experimentale sunt cele prezentate în figurile 6.5 și 6.6.

Tubul din stânga este cuplat mecanic rigid cu tija cu cremalieră a unui sistem de deplasare DISA. Acesta oferă posibilitatea deplasării pe verticală a tije prin acționarea unui motor pas-cu-pas. Deplasarea tije este afișată numeric de sistemul DISA și este de 0,2 mm pentru un pas al motorului (ceea ce corespunde unei variații a nivelului lichidului magnetic de 0,1 mm în tubul din dreapta). O punte electronică măsoară variația de inductivitate a bobinei datorată variației nivelului lichidului magnetic din interiorul său.

După măsurători repetate s-a constatat că rezultatele măsurătorilor sunt repetitive cu precizie de aproximativ 0,1%.

6.3 Rezultatele măsurătorilor experimentale

Pe baza principiului de măsură pentru analiza liniarității bobinelor electrice cu miez magnetic lichid și a standurilor de măsură aferente (fig. 6.5 și fig. 6.6), s-au realizat măsurători experimentale de inductivitate și variație de inductivitate asupra bobinelor din figurile 6.1 și 6.2, bobine având drept miez magnetic lichide magnetice cu permeabilități magnetice diferite.

Se prezintă în continuare rezultatele măsurătorilor experimentale obținute utilizând bobina mică.

Dimensiunile geometrice ale bobinei electrice, importante din punct de vedere electric sunt prezentate în figura 6.1. Figura 6.4 prezintă amplasarea bobinei din figura 6.1 peste tubul de sticlă iar figura 6.5 o vedere de ansamblu a standului de măsură astfel realizat.

S-au efectuat minimum trei seturi de măsurători de variație de inductivitate pentru fiecare tip de lichid magnetic în parte. Rezultatele experimentale sunt prezentate în tabelele 6.1 ... 6.4 iar variația inductivității este reprezentată grafic în figurile 6.7 ... 6.10.

Având măsurate valorile inductanțelor bobinelor, cu și fără lichid magnetic, permeabilitatea magnetică relativă inițială a lichidului magnetic (sau susceptivitatea magnetică) se poate determina prin calcul ([74]):

$$\mu_{rLM} = 1 + \chi_{LM} = 1 + \frac{L_{LM} - L_0}{L_0} \cdot \left(\frac{d_0}{d_{LM}}\right)^2 \quad (6.9)$$

unde:

d_0 = diametrul bobinajului;

d_{LM} = diametrul interior al tubului de sticlă;

L_0 = inductanța bobinei fără lichid magnetic;

L_{LM} = inductanța bobinei când lichidul magnetic umple complet tubul;

μ_{rLM} = permeabilitatea magnetică relativă (inițială) a lichidului magnetic;

χ_{LM} = susceptivitatea magnetică (inițială) a lichidului magnetic.

Deoarece pentru obținerea formulei (6.9) s-au făcut unele aproximări, este de așteptat ca asupra susceptivității magnetice a lichidului magnetic calculată cu formula (6.9) să fie necesară aplicarea unei corecții.

Pentru $d_0 = 16.37$ mm și $d_{LM} = 7$ mm valorile numerice ale inductanțelor măsurate pentru 4 tipuri diferite de lichide magnetice sunt:

$L_0 = 9$ mH;

$L_{LM1} = 15$ mH;

$L_{LM2} = 14.19$ mH;

$L_{LM3} = 13.78$ mH;

$L_{LM4} = 12$ mH.

Corespunzător acestor inductanțe, valorile numerice ale susceptivităților magnetice ale lichidelor magnetice sunt:

$\chi_{LM1} = 3.6$;

$\chi_{LM2} = 3.1$;

$\chi_{LM3} = 2.9$;

$\chi_{LM4} = 1.8$

În tabele notațiile folosite sunt:

- DISA = Indicația de poziție a sistemului DISA referitoare la deplasarea relativă a tijei de către motorul pas cu pas;
- LM = Poziția pe verticală a lichidului magnetic în interiorul bobinei, față de capătul de jos al bobinei;
- Măs. 1 ... 3 = Seturi de măsurători experimentale;
- Ind = Inductanța bobinei corespunzătoare poziției respective a lichidului magnetic;
- L_{LM} = Inductanța maximă a bobinei cu lichid magnetic;
- R_{punte} = Rezistența electrică a bobinei (măsurată cu puntea);
- μ_{rLM} = Permeabilitatea magnetică relativă inițială a lichidului magnetic;
- L_0 = Inductanța bobinei fără lichid magnetic.

Figura 6.11 prezintă sintetic variația de inductivitate a aceleiași bobine pentru cele patru tipuri diferite de lichide magnetice a căror nivel variază strict în interiorul bobinei.

Tabelul 6.1: Măsurători experimentale privind inductivitatea bobinei pentru un lichid magnetic cu permeabilitatea magnetică relativă $\mu_{rLM} = 4.6$

DI-SA	LM [mm]	Măs. 1 [mV]	Măs. 2 [mV]	Măs. 3 [mV]	Ind. [mH]	Obs.
240	+110	-303	-306	-305	15.00	Exterior
230	+105	-297	-300	-298	14.97	sus
220	+100	-282	-283	-280	14.89	
210	95	-245	-244	-241	14.72	$L_{LM} =$
200	90	-954	-189	-187	14.48	$15mH$
190	85	-130	-127	-126	14.21	
180	80	-67	-64	-61	13.92	$R_{punte} =$
170	75	-1	6	7	13.62	38.5Ω
160	70	68	74	76	13.31	
150	65	139	144	146	13.00	$\mu_{rLM} =$
140	60	210	216	218	12.68	4.6
130	55	282	290	290	12.36	
120	50	356	362	361	12.04	$L_0 =$
110	45	430	437	436	11.70	$9mH$
100	40	506	511	511	11.37	
90	35	582	586	587	11.03	
80	30	659	663	664	10.69	
70	25	737	740	740	10.35	
60	20	811	815	815	10.01	
50	15	884	889	887	9.694	
40	10	950	953	953	9.403	
30	5	1002	1005	1004	9.173	
20	-0	1032	1033	1032	9.046	Exterior
10	-5	1041	1041	1040	9.008	jos
0	-10	1043	1043	1042	9.000	

Tabelul 6.2: Măsurători experimentale privind inductivitatea bobinei pentru un lichid magnetic cu permeabilitatea magnetică relativă $\mu_{rLM} = 4.1$

DI-SA	LM [mm]	Măs. 1 [mV]	Măs. 2 [mV]	Măs. 3 [mV]	Ind. [mH]	Obs.
240	+110	-122	-121	-121	14.19	Exterior
230	+105	-117	-116	-116	14.17	sus
220	+100	-101	-101	-100	14.10	
210	95	-66	-65	-65	13.94	$L_{LM} =$
200	90	-18	-18	-18	13.73	14.19mH
190	85	35	36	36	13.49	
180	80	92	94	94	13.24	$R_{punte} =$
170	75	152	153	153	12.97	38.5 Ω
160	70	214	214	214	12.70	
150	65	276	275	275	12.43	$\mu_{rLM} =$
140	60	338	338	337	12.15	4.1
130	55	402	401	400	11.87	
120	50	465	464	463	11.59	$L_0 =$
110	45	530	528	527	11.30	9mH
100	40	594	593	592	11.01	
90	35	662	659	657	10.72	
80	30	728	725	723	10.43	
70	25	795	791	789	10.13	
60	20	860	856	854	9.847	
50	15	922	918	916	9.571	
40	10	978	974	972	9.323	
30	5	1020	1017	1015	9.133	
20	-0	1042	1040	1038	9.032	Exterior
10	-5	1047	1046	1044	9.007	jos
0	-10	1049	1047	1046	9.000	

Tabelul 6.3: Măsurători experimentale privind inductivitatea bobinei pentru un lichid magnetic cu permeabilitatea magnetică relativă $\mu_{rLM} = 3.9$

DI-SA	LM [mm]	Măs. 1 [mV]	Măs. 2 [mV]	Măs. 3 [mV]	Ind. [mH]	Obs.
240	+110	108	109	108	13.78	Exterior
230	+105	112	113	112	13.76	sus
220	+100	124	125	125	13.69	
210	95	151	153	152	13.55	$L_{LM} =$
200	90	189	191	191	13.36	13.78mH
190	85	232	235	234	13.13	
180	80	279	281	281	12.90	$R_{punte} =$
170	75	327	329	329	12.65	38.5 Ω
160	70	376	377	377	12.40	
150	65	425	427	427	12.15	$\mu_{rLM} =$
140	60	475	476	477	11.89	3.9
130	55	526	526	527	11.64	
120	50	576	576	577	11.38	$L_0 =$
110	45	627	627	628	11.12	9mH
100	40	678	678	679	10.86	
90	35	730	730	731	10.59	
80	30	783	782	784	10.32	
70	25	835	834	836	10.06	
60	20	887	886	888	9.795	
50	15	937	936	937	9.540	
40	10	981	979	981	9.317	
30	5	1017	1015	1017	9.133	
20	-0	1038	1034	1036	9.032	Exterior
10	-5	1043	1040	1041	9.005	jos
0	-10	1044	1041	1042	9.000	

Tabelul 6.4: Măsurători experimentale privind inductivitatea bobinei pentru un lichid magnetic cu permeabilitatea magnetică relativă $\mu_{rLM} = 2.8$

DI-SA	LM [mm]	Măs. 1 [mV]	Măs. 2 [mV]	Măs. 3 [mV]	Ind. [mH]	Obs.
240	+110	393	393	393	12.00	Exterior
230	+105	395	395	395	11.99	sus
220	+100	402	402	402	11.95	
210	95	420	420	420	11.87	$L_{LM} =$
200	90	446	446	446	11.75	$12mH$
190	85	477	477	477	11.61	
180	80	510	510	510	11.46	$R_{punte} =$
170	75	544	544	544	11.30	38.5Ω
160	70	578	578	578	11.14	
150	65	613	613	613	10.98	$\mu_{rLM} =$
140	60	648	648	648	10.82	2.8
130	55	684	683	683	10.66	
120	50	719	718	718	10.50	$L_0 =$
110	45	755	753	754	10.33	$9mH$
100	40	791	789	790	10.17	
90	35	827	825	826	10.00	
80	30	863	861	862	9.839	
70	25	900	898	899	9.669	
60	20	935	933	934	9.508	
50	15	970	967	968	9.350	
40	10	1001	998	999	9.207	
30	5	1027	1024	1025	9.087	
20	-0	1041	1038	1039	9.023	Exterior
10	-5	1045	1042	1043	9.004	jos
0	-10	1046	1043	1044	9.000	

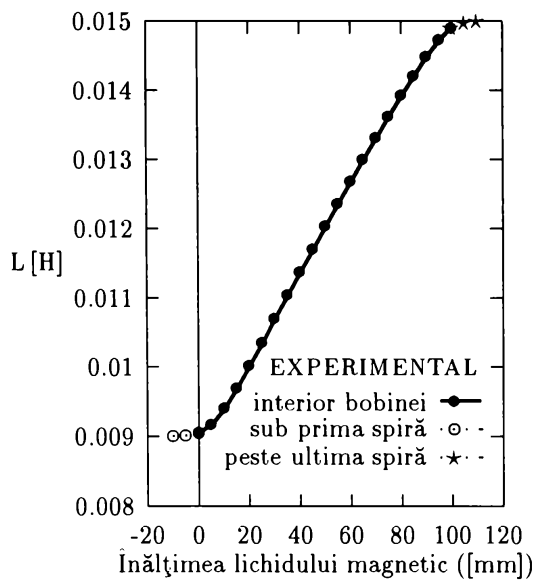


Figura 6.7: Variația inductivității bobinei pentru un lichid magnetic cu permeabilitatea magnetică relativă $\mu_{rLM} = 4.6$

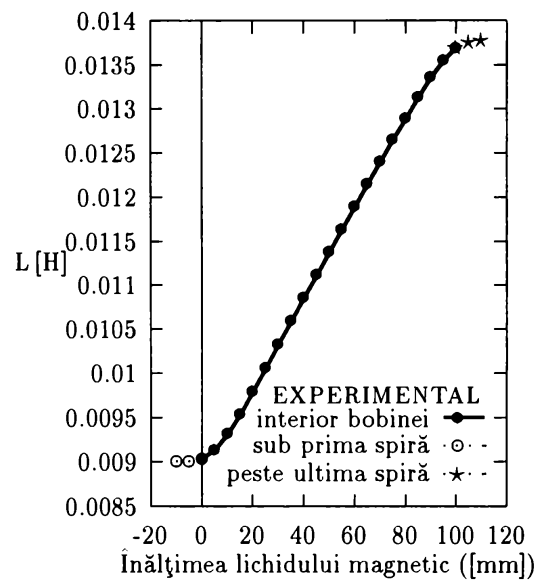


Figura 6.9: Variația inductivității bobinei pentru un lichid magnetic cu permeabilitatea magnetică relativă $\mu_{rLM} = 3.9$

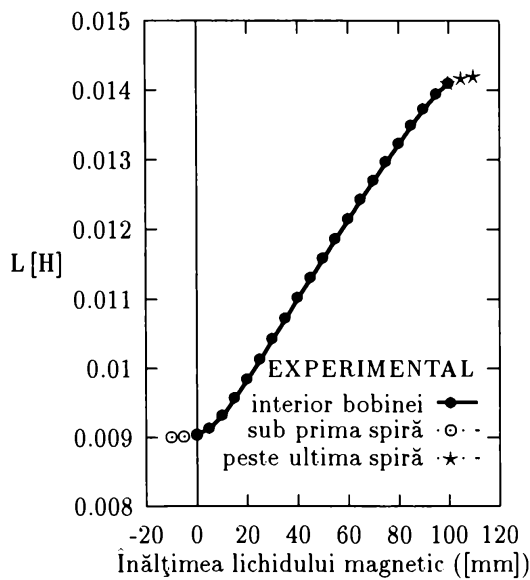


Figura 6.8: Variația inductivității bobinei pentru un lichid magnetic cu permeabilitatea magnetică relativă $\mu_{rLM} = 4.1$

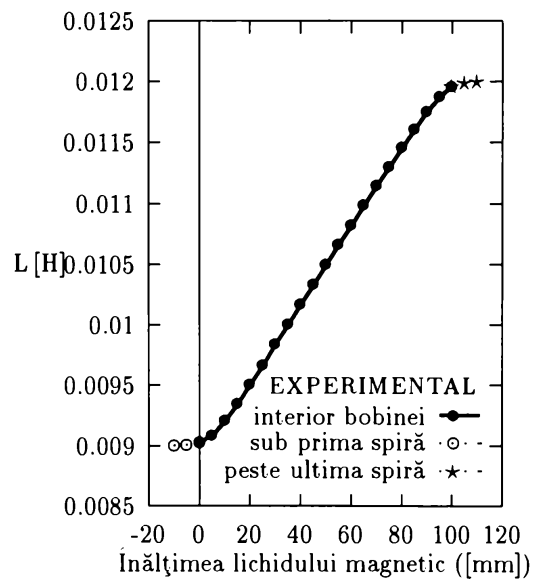


Figura 6.10: Variația inductivității bobinei pentru un lichid magnetic cu permeabilitatea magnetică relativă $\mu_{rLM} = 2.8$

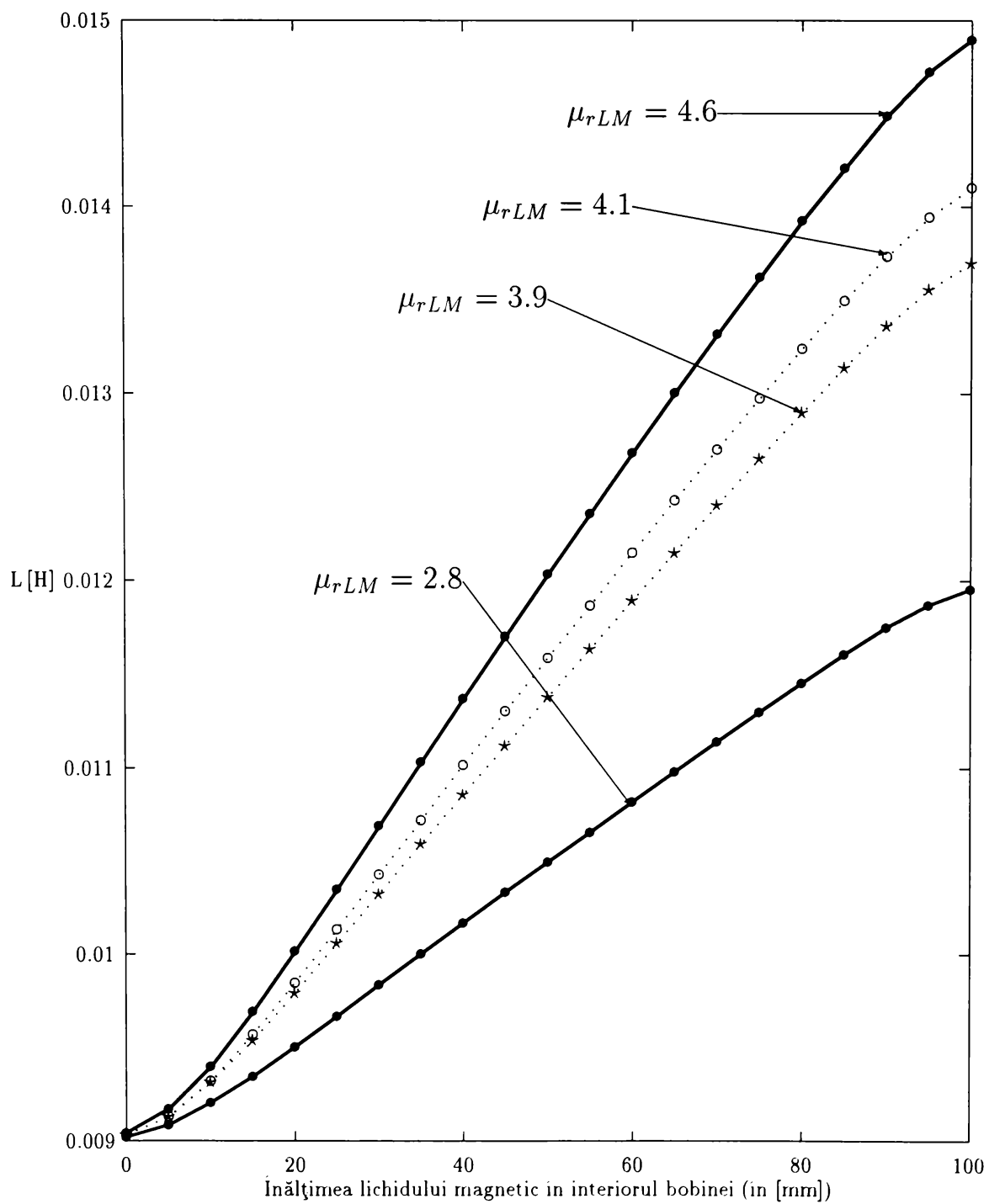


Figura 6.11: Variația comparativă de inductivitate pentru lichidul magnetic aflat strict în interiorul bobinei

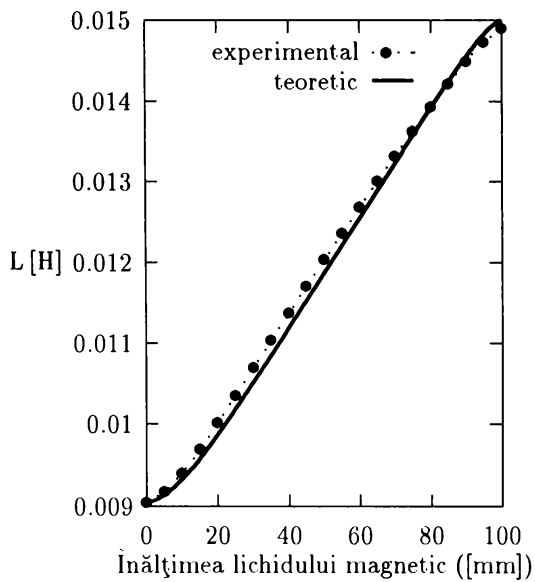


Figura 6.12: Variația inductivității bobinei pentru un lichid magnetic cu permeabilitatea magnetică relativă $\mu_{rLM1C} = 5.7$

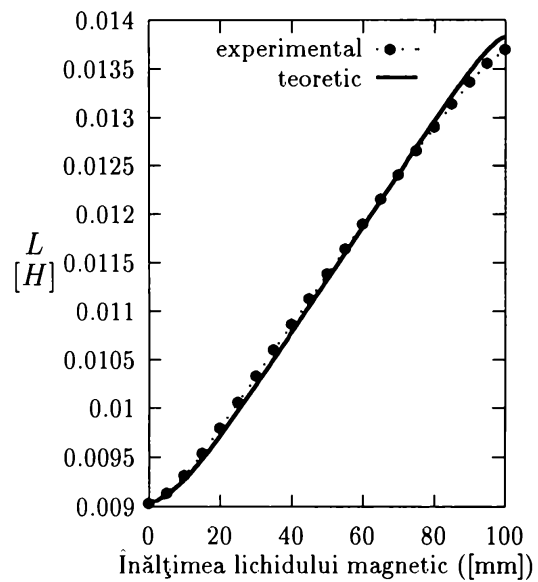


Figura 6.14: Variația inductivității bobinei pentru un lichid magnetic cu permeabilitatea magnetică relativă $\mu_{rLM3C} = 4.4$

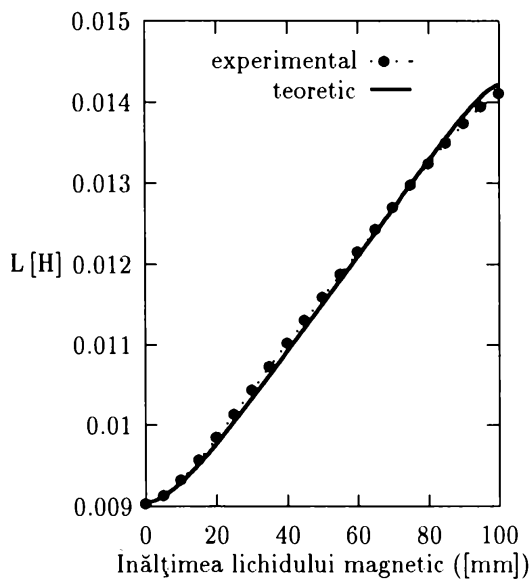


Figura 6.13: Variația inductivității bobinei pentru un lichid magnetic cu permeabilitatea magnetică relativă $\mu_{rLM2C} = 4.8$

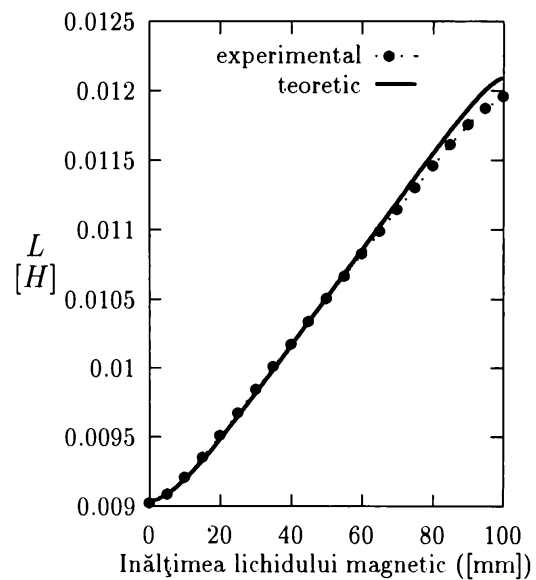


Figura 6.15: Variația inductivității bobinei pentru un lichid magnetic cu permeabilitatea magnetică relativă $\mu_{rLM4C} = 2.9$

6.4 Comparație cu variantele calculate numeric

În literatura de specialitate este cunoscut faptul că între valoarea calculată a inductanței unei bobine (chiar și fără miez) și valoarea ei reală există o diferență care trebuie luată în considerație.

Această diferență este datorată faptului că spirele reale ale bobinei nu respectă geometria luată în calcul, este prezentă izolația de lac și aer între spire, există o abatere între inductanța calculată în curent continuu și cea măsurată în curent alternativ etc.

În [75], între valoarea calculată L_c și valoarea măsurată L_m a unei bobine se recomandă introducerea unei corecții de forma:

$$L_m = L_c + \Delta L \quad (6.10)$$

(numită corecție asupra izolației).

În cazul bobinei din figura 6.1 experimental s-a stabilit valoarea lui ΔL (fără lichid magnetic), $\Delta L = -1.5 mH$.

Prin rulaje repetate s-a stabilit că pentru lichide magnetice uzuale, asupra susceptivității magnetice inițiale a lichidului magnetic calculată cu relația (6.9) este preferabilă o corecție de forma

$$\chi_{LMC} = (1.05 \dots 1.35) \cdot \chi_{LM}$$

fapt realizat suficient de bine de formula (6.11).

$$\chi_{LMC} = \left[1 + 0.012 \cdot \frac{L_{LM} - L_0}{L_0} + 0.657 \cdot \left(\frac{L_{LM} - L_0}{L_0} \right)^2 \right] \cdot \chi_{LM} \quad (6.11)$$

În această situație permeabilitățile magnetice relative corectate care se vor introduce în programul de calcul sunt:

$$\mu_{\tau LM1C} = 5.7;$$

$$\mu_{\tau LM2C} = 4.8;$$

$$\mu_{\tau LM3C} = 4.4;$$

$$\mu_{\tau LM4C} = 2.9$$

Figurile 6.12 ... 6.15 prezintă pe același grafic valoarea calculată (la care s-a aplicat corecția din relația (6.10) și (6.11)) și valoarea măsurată experimental pentru bobina din figura 6.1 și pentru cele patru tipuri diferite de lichide magnetice ([76]).

Partea II

Aplicațiile în tehnică ale traductoarelor inductive diferențiale cu lichid magnetic

7

Traductoare diferențiale cu lichid magnetic.

7.1 Diferența de inductivitate. Liniaritatea traductoarelor

Traductoarele magnetofluidice pentru mărimi aerodinamice sunt în general diferențiale. Utilizând programe de calcul elaborate de autor, în prezentul capitol se analizează forma de variație a diferenței de inductivitate pentru un traductor diferențial și abaterea de la liniaritate a acestei diferențe de inductivitate.

O primă analiză foarte rapidă a diferenței de inductivitate și a liniarității traductoarelor diferențiale se poate face utilizând rezultatele teoretice obținute cu una din metodele analitice de calcul al inductivității bobinelor traductoarelor magnetofluidice. De exemplu, utilizând relația (2.15), în figura 7.1 s-au reprezentat curbele de variație a inductivității relative a bobinei, funcție de nivelul lichidului magnetic din bobină, pentru 3 valori diferite ale parametrului α (3 lungimi diferite de bobină) (permeabilitatea magnetică relativă a lichidului magnetic este $\mu_{r2} = 1,1$). În figura 7.2 s-au reprezentat aceleași curbe dar pentru valori diferite ale permeabilității magnetice relative a lichidului magnetic.

Din cele două reprezentări se observă că variația inductivității relative a bobinei depinde în primul rând de permeabilitatea magnetică relativă inițială a lichidului magnetic și prea puțin de dimensiunile bobinei. Pentru bobine lungi, cum era de așteptat, inductivitatea relativă maximă este aproape egală cu valoarea numerică a permeabilității magnetice relative inițiale a lichidului magnetic.

Deși, așa cum rezultă din figura 7.1, variația inductivității relative a bobinei depinde puțin de dimensiunile bobinei, în cazul traductoarelor diferențiale, diferența de inductivitate este pronunțat dependentă de acestea.

În figura 7.3 s-au reprezentat curbele de variație ale diferenței de inductivitate pentru un traductor diferențial (vezi cap. 8 și 9) funcție de nivelul lichidului magnetic, pentru 4 valori diferite ale parametrului α , iar, în figura 7.4 s-a reprezentat variația diferenței de inductivitate funcție de α pentru 3 valori diferite ale lui t .

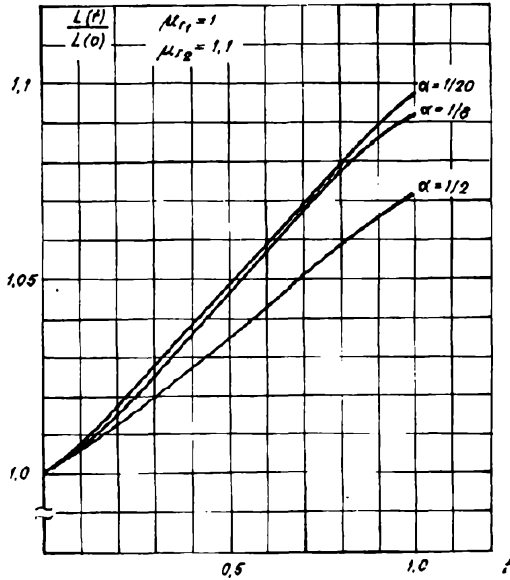


Figura 7.1: Variația inductivității relative a bobinei, funcție de nivelul lichidului magnetic din bobină, pentru 3 valori diferite ale parametrului α (3 lungimi diferite de bobină).

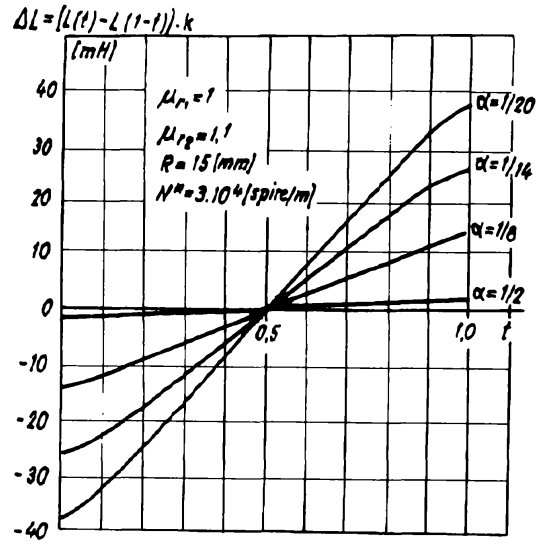


Figura 7.3: Variația diferenței de inductivitate funcție de nivelul lichidului magnetic pentru 4 lungimi diferite de bobine

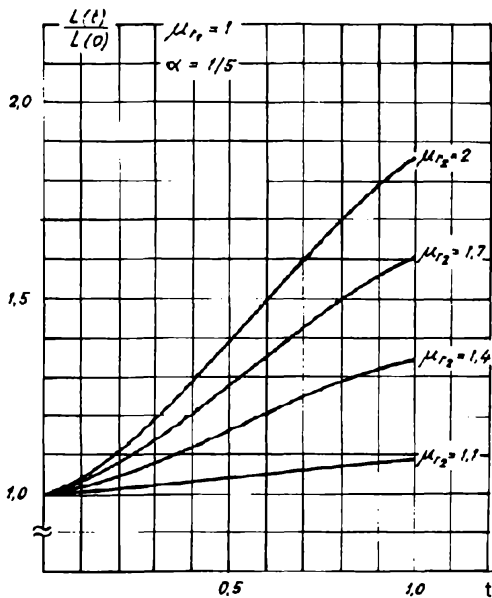


Figura 7.2: Variația inductivității relative a bobinei, funcție de nivelul lichidului magnetic din bobină, pentru valori diferite ale permeabilității magnetice relative a lichidului magnetic.

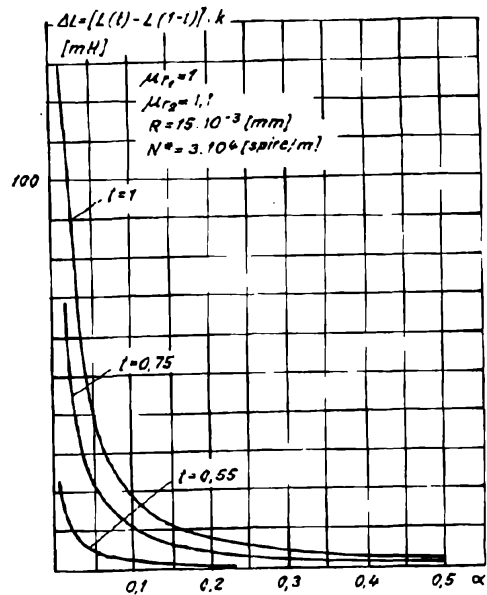


Figura 7.4: Variația diferenței de inductivitate funcție de lungimile bobinelor pentru 3 nivele diferite ale lichidului magnetic

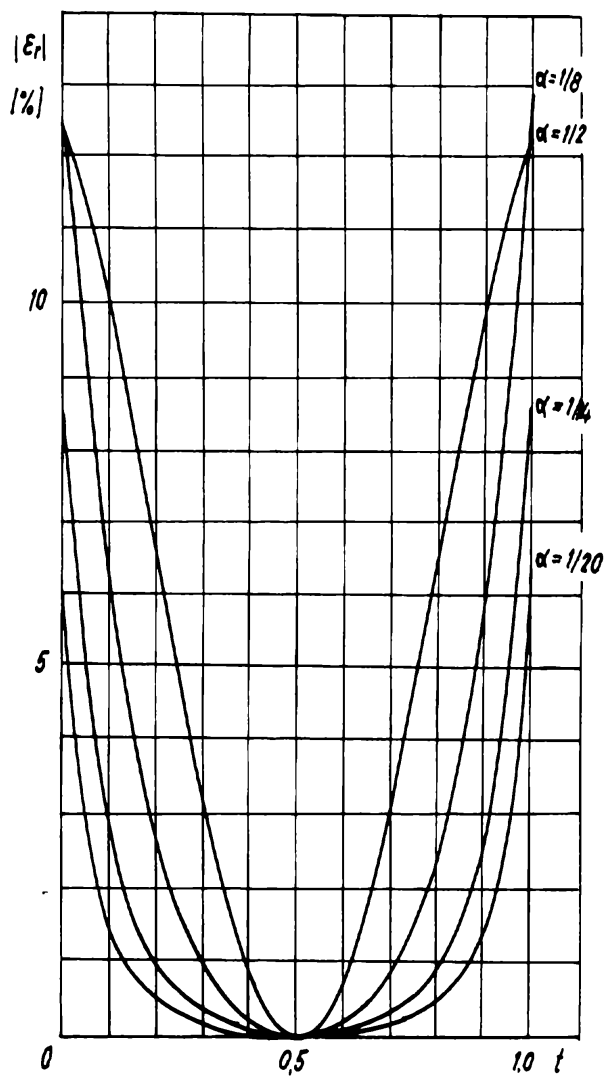


Figura 7.5: Variația erorii relative de neliniaritate funcție de nivelul lichidului magnetic pentru 4 lungimi diferite de bobine. (Aproximarea curbelor s-a făcut cu drepte tangente lor în punctul de abscisă $t=1/2$.)

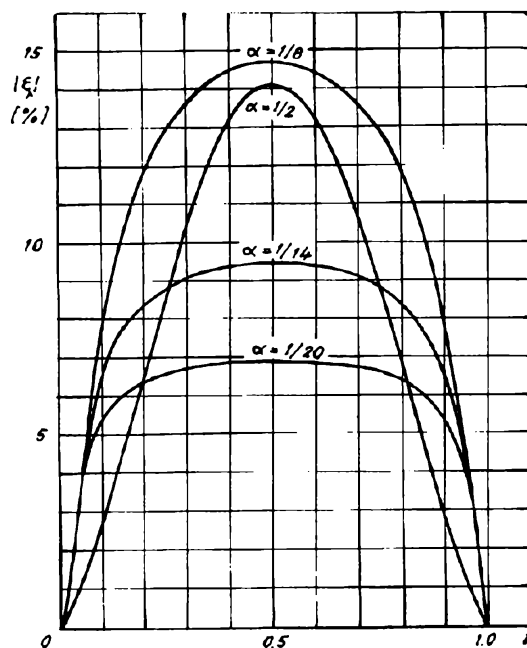


Figura 7.6: Variația erorii relative de neliniaritate funcție de nivelul lichidului magnetic pentru 4 lungimi diferite de bobine. (Aproximarea curbelor s-a făcut cu drepte ce trec prin capetele curbelor.)

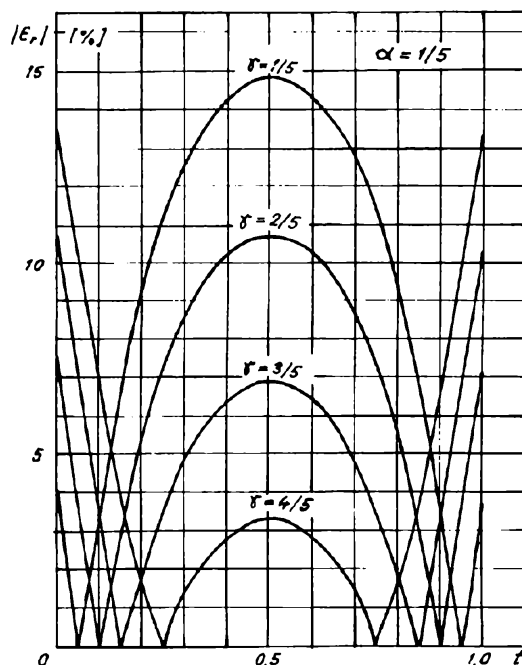


Figura 7.7: Variația erorii relative de neliniaritate funcție de nivelul lichidului magnetic pentru 4 lungimi diferite de bobine. (Aproximarea curbelor s-a făcut cu drepte de pantă γ .)

7.2 Eroarea relativă de neliniaritate

Ținând cont că în multe situații (cum ar fi de exemplu traductorul diferențial de presiune) mărimea fizică de măsurat produce o denivelare liniară a lichidului magnetic din brațele unui traductor diferențial, este util a se cunoaște abaterea de la liniaritate a variației diferenței de inductivitate a traductorului diferențial cu lichid magnetic, funcție de denivelare și varianta optimă de etalonare.

Astfel, aproximând curbele din figura 7.3 cu dreptele tangente lor în punctul de abscisă $t=1/2$, evoluția erorii relative de neliniaritate ε_r funcție de t și parametrul α , este prezentată în figura 7.5.

$$\varepsilon_r = \left[1 - \frac{L(t) - L(1-t)}{P(t)} \right] \cdot 100 \quad [\%] \quad (7.1)$$

unde $P(t)$ sunt ecuațiile dreptelor cu care se aproximează curbele din figura 7.3 ([77, 78]).

Se observă posibilitatea realizării traductoarelor cu abaterea de la liniaritate dorită, prin alegerea corespunzătoare a dimensiunilor geometrice ale traductoarelor.

Figura 7.6 reprezintă evoluția erorii relative de neliniaritate funcție de t și α în cazul în care curbele din figura 7.3 sunt approximate cu drepte care trec prin punctele de pe curbe de abscise $t=1/2$ și $t=1$.

Aproximarea curbilor din figura 7.3 cu alte drepte de pantă γ cuprinsă între pantele celor două drepte precizate anterior, duce la o variație a erorii relative de neliniaritate de forma curbilor din figura 7.7. Se observă posibilitatea reducerii erorii relative de neliniaritate în zona de lucru a traductorului printr-o etalonare corespunzătoare.

Pe baza rezultatelor de calcul prezentate mai sus s-a conceput un algoritm de proiectare pe calculator a traductoarelor diferențiale inductive cu lichid magnetic, la parametri tehnici doriți și cu dimensiuni de gabarit minime.

8

Principiul electric de măsurare a diferenței de inductivitate

8.1 Expresia tensiunii diferențiale \underline{U}_d și U_{dmed}

Pentru echilibrarea unei punți de curent alternativ este nevoie de două reglaje: unul de fază și altul de amplitudine. În prezentul capitol se studiază teoretic un sistem original de măsură a unei diferențe de inductivitate, specific traductoarelor diferențiale inductive cu lichid magnetic, care să permită aducerea la zero a unei tensiuni de ieșire dintr-un singur reglaj (de preferință rezistiv). Se analizează de asemenea limitele în care acest sistem de măsură poate fi adus la zero, liniaritatea lui, precum și influența reglajului de zero asupra etalonării sistemului de măsură.

În figura 8.1 se prezintă ca exemplu de traductor inductiv cu lichid magnetic, traductorul diferențial de presiune în gaze ([24, 79, 80]). Acesta este format în principal dintr-un tub în formă de U în care la echilibru se află lichid magnetic până la jumătate din înălțimea brațelor sale verticale. În jurul fiecăreia dintre ramurile verticale ale tubului U este amplasată câte o bobină electrică cu bobinaj uniform (L_1 și L_2). La apariția unei diferențe de presiune între prizele 1 și 2 ale tubului U, lichidul magnetic se denivelează iar bobinele L_1 și L_2 își modifică inductanțele. Un sistem electronic de măsură sesizează diferența de inductivitate $L_2 - L_1$ care, în anumite limite, este direct proporțională cu diferența de presiune de la prizele de presiune ale traductorului. Procesarea analogică a semnalului electric este aproape aceeași pentru întreaga familie de traductoare, sistemele electronice de măsură specifice fiecărui tip de traductor în parte diferind în principal prin procesarea digitală a semnalelor electrice.

Spre deosebire de traductoarele inductive cu miez feromagnetic solid, în cazul miezului feromagnetic lichid apare problema variației termice de volum mai pronunțate pentru lichidul magnetic decât pentru recipientul în care se află. Anularea influenței temperaturii traductorului asupra măsurătorilor s-a făcut prin alegerea unui sistem de măsură diferențial. Puntea de curent alternativ din figura 8.2 este separată de generator printr-un transformator de adaptare iar indicatorul electronic de nul este comandat în fază cu tensiunea de alimentare a punții notată pe figură cu \underline{U} . Impedanțele celor două bobine cu miez de lichid magnetic din figura 8.1 sunt notate în figura 8.2 cu \underline{Z}_1 și respectiv \underline{Z}_2 iar R_a și R_b sunt cele două secțiuni ale unui potențiomtru cu care se dorește aducerea la zero a indicației sistemului de măsură. Tensiunea diferențială între brațele punții notată pe figură cu \underline{U}_d este o măsură electrică a mărimii fizice care se măsoară cu traductorul mag-

netofluidic respectiv. \underline{U}_d este variabilă la excursia lichidului magnetic dintr-un recipient în altul. Tehnologic, cele două impedanțe \underline{Z}_1 și \underline{Z}_2 pot fi realizate cu rezistențe practic egale, deci putem scrie $\underline{Z}_1 = R' + jX_1$ $\underline{Z}_2 = R' + jX_2$, unde X_1 și X_2 sunt reactanțele inductive ale celor două bobine. Din expresia inductanței unei bobine în funcție de înălțimea coloanei de lichid magnetic din interiorul său observăm că la excursia lichidului magnetic dintr-un rezervor în altul sunt satisfăcute cu foarte bună aproximație egalitățile:

$$X_1 + X_2 = K' \text{ (constant)} \quad X_2 = X(1 + \alpha') \quad X_1 = X(1 - \alpha')$$

unde pentru lichide magnetice uzuale $-0,1 \leq \alpha' \leq +0,1$ iar X poate fi reactanța inductivă a bobinelor când lichidul magnetic nu este denivelat. Cu aceste observații factorul de calitate al bobinelor se poate scrie sub forma:

$$Q = \frac{K'}{2R'}$$

iar \underline{U}_d are expresia ([48])

$$\underline{U}_d = \underline{U} \left\{ f(\alpha', Q) \exp[j\varphi'(\alpha', Q)] - \frac{R_b}{R_a + R_b} \right\} \quad (8.1)$$

unde

$$f(\alpha', Q) = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{[1 + (1 + \alpha') Q^2]^2 + \alpha'^2 Q^2}}{1 + Q^2} \quad (8.2)$$

iar defazajul între \underline{U}_d și \underline{U} este:

$$\varphi'(\alpha', Q) = \arctan \frac{\alpha' Q}{1 + (1 + \alpha') Q^2} \quad (8.3)$$

8.2 Aducerea la zero a tensiunii U_{dmed}

Tensiunea \underline{U}_d este defazată față de tensiunea \underline{U} cu unghiul φ' , deci pentru echilibrarea punții este nevoie de două reglaje; unul de fază și altul de amplitudine ([81]). Totuși, pentru lichide magnetice defazajul fiind foarte mic, permite măsurarea cu puntea dezechilibrată fără ca amplificatoarele de curent alternativ să intre în limitare.

Pentru a obține un sistem de măsură cât mai simplu, care să poată fi adus la zero dintr-un singur reglaj, în locul tensiunii \underline{U}_d se va folosi ca măsură electrică a mărimii fizice de măsurat, valoarea medie a tensiunii obținută prin redresarea dublă alternanță în fază cu \underline{U} , a tensiunii \underline{U}_d . Expresia acestei tensiuni medii este:

$$U_{dmed} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U \left\{ f(\alpha', Q) \cos[\varphi'(\alpha', Q)] - \frac{R_b}{R_a + R_b} \right\} \quad (8.4)$$

unde U este valoarea efectivă a tensiunii \underline{U} .

Pentru ca aducerea la zero a tensiunii U_{dmed} să fie posibilă indiferent de caracteristicile electrice ale bobinelor (indiferent de Q) și indiferent de poziția lichidului magnetic (α' în limitele precizate), trebuie să putem realiza din potențiomtru egalitatea:

$$\frac{R_b}{R_a + R_b} = f(\alpha', Q) \cos[\varphi'(\alpha', Q)] \quad (8.5)$$

Evident:

$$\frac{R_b}{R_a + R_b} \in [0, 1] \quad \forall R_a, R_b \in [0, \infty)$$

Din analiza funcției $\varphi'(\alpha', Q)$ se observă că pentru

$$\alpha' \in [-0, 1; +0, 1]$$

avem:

$$0 \leq \cos[\varphi'(\alpha', Q)] \leq 1 \quad \forall Q \in (0, \infty)$$

Analizând și funcția $f(\alpha', Q)$ se constată că este strict crescătoare față de Q și pentru $\alpha' = +0, 1$

$$\lim_{Q \rightarrow \infty} f(\alpha', Q) < 1$$

Deci, egalitatea (8.5) poate fi realizată din potențiometrul rezistiv (R_a, R_b) indiferent de caracteristicile bobinelor și indiferent de poziția lichidului magnetic.

8.3 Liniaritatea principiului de măsurare

8.3.1 Cazul semnalului pilot în fază cu tensiunea de alimentare a punții

Presupunem cazul unui sistem de măsură la care semnalul pilot de comandă a redresării în fază este dat de tensiunea de alimentare a punții U , iar aducerea la zero a sistemului de măsură s-a făcut la un dezechilibru al reactanțelor inductive notat cu α_1 . În acest caz reglajul de zero al potențiometrului se va face astfel încât:

$$\frac{R_b}{R_a + R_b} = f(\alpha_1, Q) \cos[\varphi'(\alpha_1, Q)]$$

iar tensiunea medie redresată în fază are expresia:

$$U_{dmed}(\alpha', Q) = \frac{\sqrt{2}U}{\pi} \frac{Q^2}{1 + Q^2} (\alpha' - \alpha_1) \quad (8.6)$$

căre este ecuația unei drepte.

Un caz particular al acestei drepte se obține pentru $\alpha_1 = 0$ ceea ce corespunde situației în care aducerea la zero s-a făcut în momentul în care inductanțele bobinelor erau egale.

8.3.2 Cazul semnalului pilot de comandă defazat

Dacă semnalul pilot de redresare în fază este defazat cu unghiul β' față de tensiunea de alimentare a punții, expresia tensiunii medii redresate devine:

$$U_{dmed}(\alpha', Q, \beta') = \frac{2\sqrt{2}U}{\pi} \left\{ f(\alpha', Q) \cos[\varphi'(\alpha', Q) + \beta'] - \frac{R_b}{R_a + R_b} \cos\beta' \right\} \quad (8.7)$$

care poate fi pusă sub forma:

$$U_{dmed}(\alpha', Q, \beta') = \frac{2\sqrt{2}U}{\pi} \left\{ \frac{1}{2} \frac{Q}{1 + Q^2} (Q \cos\beta' - \sin\beta') \alpha' + \left(\frac{1}{2} - \frac{R_b}{R_a + R_b} \right) \cos\beta' \right\} \quad (8.8)$$

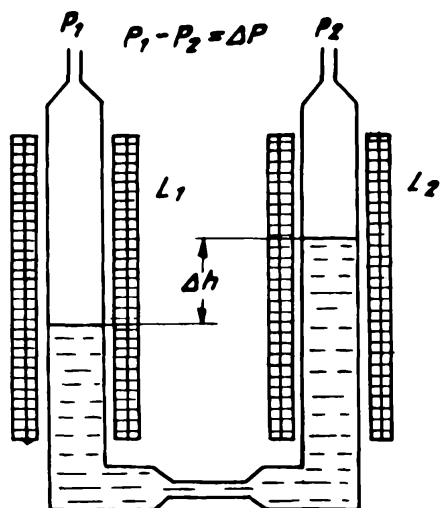


Figura 8.1: Principiul constructiv al traductorului de presiune diferențială pentru gaze.

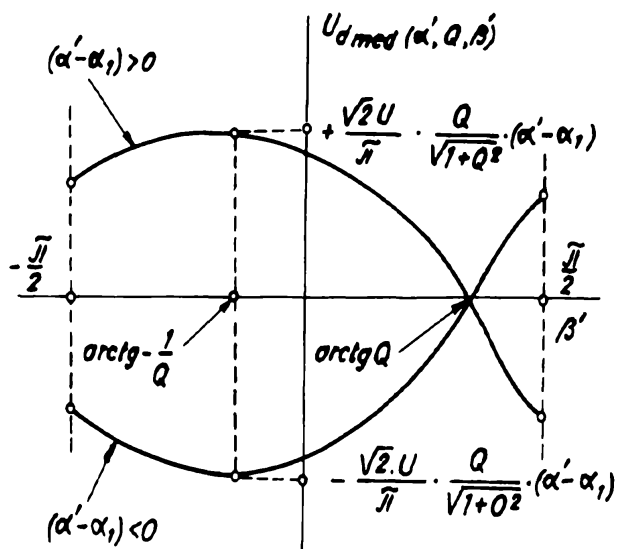


Figura 8.3: Graficul ecuației $U_{d\text{med}}(\alpha', Q, \beta')$, în funcție de unghiul β' .

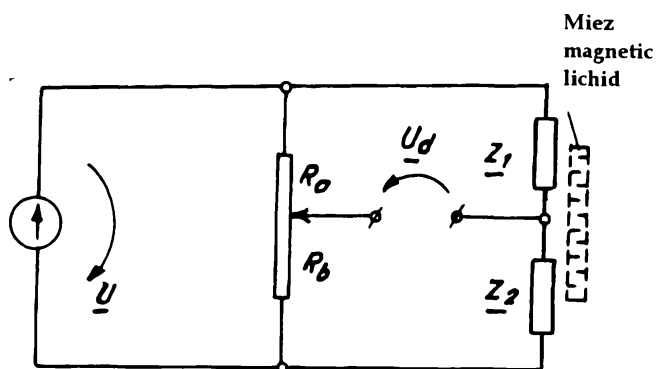


Figura 8.2: Legarea traductorului în puntea de măsură.

(relație valabilă pentru $\operatorname{tg}\beta' \neq Q$ și $\cos\beta' \neq 0$)

Impunând condițiile:

$$\frac{R_b}{R_a + R_b} \in [0, 1] \quad \text{pentru } \forall R_a, R_b \in \mathfrak{R}_+ \quad \text{și} \quad (8.9)$$

$$\alpha' \in (-0, 1; +0, 1) \quad (8.10)$$

se ajunge la concluzia că aducerea la zero din potențiomtru se poate face pentru β' cuprins în limitele:

$$\arctan -\frac{2\sqrt{1-\alpha_1}}{\alpha_1} \leq \beta' \leq \arctan \frac{2\sqrt{1+\alpha_1}}{\alpha_1}$$

adică

$$-87^\circ \leq \beta' \leq +88^\circ$$

În acest caz expresia tensiunii medii redresate în fază este:

$$U_{dmed}(\alpha', Q, \beta') = \frac{U\sqrt{2}}{\pi} \frac{Q}{1+Q^2} (Q \cos \beta' - \sin \beta') (\alpha' - \alpha_1) \quad (8.11)$$

relație care reprezintă deasemenea ecuația unei drepte de variabilă α' .

Se observă că pentru $\beta' = 0$ ecuația (8.11) se reduce la (8.6).

8.4 Concluzii

În concluzie:

- În cazul sistemului electronic de măsură aferent traductoarelor inductive cu lichid magnetic pentru mărimi aerodinamice, înclinare și accelerare, se preferă un montaj diferențial al traductorului în punte de curent alternativ.
- Defazajul punții fiind mic indiferent de poziția lichidului magnetic, este posibilă măsurarea cu puntea necompensată în fază, fără ca amplificatoarele de curent alternativ să intre în limitare.
- Reglajul de zero al sistemului se poate face dintr-un singur element de reglaj, rezistiv, ceea ce permite o automatizare simplă a procedurii de aducere la zero.
- Din cele prezentate se observă că principiul de măsură propus este perfect liniar și permite aducerea la zero a sistemului de măsură, în limite foarte largi, practic în cazul oricărui traductor inductiv cu miez feromagnetic lichid. Aducerea la zero se face fără afectarea etalonării aparatului (fără modificarea pantei dreptei respective).
- Analizând de exemplu ecuația (8.6), panta dreptei (m) este dată de formula :

$$m = \frac{U\sqrt{2}}{\pi} \frac{Q^2}{1+Q^2}$$

sau

$$m = k_1 \frac{Q^2}{1+Q^2}$$

iar valorile pantei sunt:

$$\begin{aligned} Q = 1 & \quad m = k_1 \frac{1}{2} \\ Q = 3 & \quad m = k_1 \frac{9}{10} \\ Q \rightarrow \infty & \quad m \rightarrow k_1 \end{aligned}$$

Se observă că nu se justifică eforturi mari pentru îmbunătățirea factorului de calitate al bobinelor. Un factor de calitate 3 asigură de exemplu 90 % din eficiența unor inductanțe pure.

- Considerând ecuația (8.11) se poate analiza comportarea mărimii U_{dmed} în funcție de defazajul tensiunii pilot de comandă a redresării în fază (β') față de tensiunea de alimentare a punții de măsură. Graficul funcției $U_{dmed}(\alpha', Q, \beta')$ în funcție de β' este prezentat în figura 8.3 pentru

$$-\frac{\pi}{2} < \beta' < +\frac{\pi}{2}$$

Din figură se observă necesitatea evitării unghiului de defazaj pentru care

$$\beta' = \arctan Q$$

caz în care sistemul de măsură nu funcționează deoarece tensiunea U_{dmed} este nulă indiferent de valoarea lui α' . Deasemenea se observă existența unui unghi optim de realizare a comenzii de redresare în fază, unghi care este dat de relația:

$$\beta' = \arctan -\frac{1}{Q}$$

În acest caz panta dreptei atinge valoarea maximă

$$m_{max} = \frac{U \sqrt{2}}{\pi} \frac{Q}{\sqrt{1+Q^2}}$$

iar variația acestei pante ca urmare a modificărilor nedorite ale lui β' este minimă.

- Examinând expresia generală a tensiunii medii redresate în fază (8.4) putem obține informații și în ce privește stabilitatea indicației la variația frecvenței.

9

Aplicații ale traductoarelor inductive diferențiale cu lichid magnetic

9.1 Traductorul diferențial de presiune pentru gaze

În acest capitol se descriu concret câteva din aplicațiile originale ale traductoarelor inductive diferențiale cu lichid magnetic (de tipul celor analizate în capitolele 2 ... 8) la măsurarea unor mărimi aerodinamice și înclinării. Programele de dimensionare pe calculator a traductoarelor, proiectele electrice la nivel de schemă electrică și cablaj, realizările practice, punerile în funcțiune și măsurătorile experimentale prezentate mai jos aparțin autorului. Desenele de execuție mecanică a sesizorului (ne prezentate în această lucrare) au fost realizate de domnul C.ș.p.II ing. Iosif Potencz. Schema pneumatică pentru măsurarea cu DDS-01 în regim automat a fost realizată în colaborare cu C.ș.p.III ing. Mircea Gașpar. Execuția produselor DDS-01 și DBDO-01 s-a făcut de către un colectiv de specialiști din cadrul AEM-SA Timișoara pe baza proiectelor electrice la nivel de schemă electrică, realizate de autor. Omologarea acestor produse s-a făcut de către colectivul AEM-SA în urma punerii în funcțiune, a verificărilor conform caietului de sarcini și a buletinelor de analiză efectuate de autor în cadrul C.C.H.C.L.M..

În continuare prin noțiunea de traductor se va înțelege **sesizorul** format din ansamblul hidraulic și al bobinelor cu miez magnetic lichid împreună cu **sistemul electronic** de prelucrare a semnalelor.

Principiul de funcționare al traductorului diferențial de presiune pentru gaze, necompensat la influența înclinațiilor și accelerațiilor asupra măsurătorilor, este descris în capitolul 8. Pentru a corecta erorile introduse de eventuale înclinații sau accelerații asupra măsurătorilor se poate proceda astfel:

- 1) Se cuplează mecanic un sesizor magnetofluidic de presiune diferențială, cu un sesizor magnetofluidic de înclinare (descriș în capitolul 9). Se înseriază bobinele lor conform celor descriș în capitolele 8 și 9 și se prelucrează semnalul rezultat pe un singur canal electronic.
- 2) Se cuplează mecanic un sesizor magnetofluidic de presiune diferențială, cu un sesizor magnetofluidic de înclinare (descriș în capitolul 9). Semnalele lor analogice se prelucrează pe căi electronice separate și se însumează apoi printr-un amplificator sumator.

- 3) Se cuplează mecanic un senzor magnetofluidic de presiune diferențială, cu orice traductor de înclinare. Semnalele lor finale se prelucrează apoi analogic sau numeric, după caz.

Soluția 1) prezintă avantajul utilizării unui singur canal de prelucrare electronică a semnalului. Este aplicabilă numai atunci când cele două sesizoare, de presiune și respectiv de înclinare, au bobinele identice și plasate la aceeași distanță una față de alta. În caz contrar este preferabilă soluția 2). Practic, s-a proiectat, realizat și experimentat, un model experimental de traductor diferențial de presiune în gaze, necompensat la înclinare, cu 4 domenii de măsură, domeniul maxim de presiune fiind de $200 \text{ mmH}_2\text{O}$. Cele două părți componente, senzorul și sistemul electronic, au fost realizate separat (fig. 9.1). Schema bloc de funcționare este descrisă în capitolul 9 iar schemele electrice de detaliu în figurile 9.2 ... 9.8. Măsurătorile experimentale efectuate asupra acestui model experimental de traductor au confirmat măsurătorile efectuate anterior pe sesizoare similare asistate de punțile tensometrice I.E.M.I. ([24, 82])(fig. 9.9). Ca aplicații tipice ale traductorului diferențial de presiune în gaze se pot enumera:

- măsurarea vitezei vântului;
- măsurători de viteze și presiuni în gaze pe diverse profile;
- control dimensional automat ([83] ... [86]), etc.

De asemenea, traductorul diferențial de presiune în gaze intră ca parte componentă în realizarea altor traductoare pentru mărimi aerodinamice, traductoare care vor fi descrise în subcapitolele următoare.

9.2 Traductorul diferențial de înclinare

9.2.1 Traductorul diferențial de înclinare unidirecțional

Principiul lui de funcționare (descriș și în subcapitolele 9.4 și 9.5), este similar cu cel al traductorului diferențial de presiune, cu deosebirea că denivelarea lichidului magnetic din cele două brațe ale tubului U din figura 8.1 este datorată înclinării senzorului în planul bobinelor și nu diferenței de presiune.

Practic, s-a proiectat realizat și experimentat, un model experimental de traductor diferențial de înclinare unidirecțional cu 3 domenii de măsură (200, 100 și 50 minute hexagesimale)(fig. 9.10).

Cele două părți componente; senzorul și sistemul electronic, au fost realizate separat. Schema bloc de funcționare este descrisă în subcapitolul 9.6 iar schemele electrice de detaliu sunt similare traductorului diferențial de presiune.

Aplicația cea mai răspândită până în prezent este corecția la înclinare a traductorului diferențial de presiune în gaze, dar, poate fi utilizat și la măsurători de unghiuri.

9.2.2 Traductorul diferențial de înclinare bidirecțional

Principial, senzorul este realizat din două sesizoare diferențiale de înclinare unidirecționale așezate la 90° una față de alta. Sistemul electronic conține două căi separate de prelucrare a semnalelor.

Prototipul realizat și omologat (fig. 9.11) este prevăzut cu afișare numerică a înclinării, pe două direcții, notate cu N - S și respectiv E - V (nu există nici o corelare cu punctele

cardinale). Domeniul de măsură cerut este de $\pm 3^\circ$ cu o precizie de ± 4 minute.

Din măsurătorile experimentale efectuate, se observă liniaritatea foarte bună și încadrarea în precizia de $\pm 2\%$.

Un exemplu de măsurători concrete sunt prezentate în tabelul 1 și respectiv în figura 9.12.

Tabelul 1: Măsurători experimentale asupra Dispozitivului Bidirecțional de Determinare a Orizontalității DBDO-01

Unghi real	Direcție N - S	Direcție E - V
-190	-195	-191
-170	-173	-171
-150	-153	-151
-130	-133	-131
-110	-112	-111
-90	-92	-91
-70	-70	-70
-50	-50	-50
-30	-30	-31
-15	-15	-16
0	0	0
+15	+15	+14
+30	+30	+30
+50	+50	+51
+70	+70	+71
+90	+92	+94
+110	+112	+115
+130	+132	+136
+150	+153	+156
+170	+173	+177
+190	+194	+198

Prima aplicație concretă a acestui traductor a fost orizontalizarea agregatelor aero-electrice de pe muntele Semenic (fig. 9.13). Condițiile de mediu au impus alimentarea electrică a traductorului fie de la rețea, fie de la bateria de 12 V_{cc} a unui autoturism. Schema electrică de alimentare utilizată este prezentată în figura 9.14.

9.3 Debitmetrul volumic pentru gaze

Principial, funcționarea debitmetrului cu lichid magnetic pentru gaze, se bazează pe măsurarea diferenței de presiune ce apare între două puncte ale unei conducte prin care trece un debit de gaz. Deci, sesizorul de debit, în afară de sesizorul de presiune și cel de înclinare (pentru corecție), mai conține și **tubul de măsurare** cu rol de a transforma debitul volumic de gaz în diferență de presiune. Tubul de măsurare se dimensionează special pentru domeniul de măsură dorit și pentru tipul de gaz al cărui debit se măsoară ([87]). La schimbarea domeniului de măsură al debitmetrului, sistemul electronic și bobinele sesizorului rămân aceleași, singurul subansamblu care se modifică fiind tubul de măsură.

Pe baza acestui principiu, teoretic orice debit volumic de gaz poate fi măsurat cu ajutorul debitmetrului cu lichid magnetic, schimbând numai tubul de măsură.

Datorită faptului că se preferă o curgere laminară a gazului prin tubul de măsură (situație în care diferența de presiune dintre două puncte ale conductei este proporțională cu debitul de gaz), dimensiunile de gabarit ale tubului de măsură cresc odată cu creșterea debitului de gaz măsurat. În figura 9.15 se prezintă un model experimental de debitmetru volumic cu lichid magnetic pentru gaze, format din sistemul electronic, sesizorul de debit și câteva tuburi de măsură pentru domenii mai mari.

Practic s-au proiectat, realizat și experimentat debitmetre cu lichid magnetic pentru aer, cu domenii de măsură între $50\text{cm}^3/\text{min}$ și $150\text{m}^3/\text{h}$.

Ca aplicații tipice ale debitmetrului volumic pentru gaze, solicitate până în prezent, pot fi considerate cele prezentate în subcapitolele 9.4 și 9.5, precum și controlul debitului de gaz în procesul de sudură.

9.4 Detectorul de debit de scăpări pentru gaze

Problema controlului unor parametri pe liniile de fabricație complet automatizate, implică existența unui senzor sau traductor pentru măsurarea parametrului respectiv. Dacă parametrul respectiv nu este accesibil direct sau dacă nu există un traductor pentru măsurarea lui, problema se rezolvă stabilind o modalitate de măsură indirectă, adică măsurând o altă mărime fizică proporțională ca valoare cu parametrul căutat, mărime fizică pentru care există traductor sau senzor în domeniul respectiv.

În cazul la care ne referim și anume controlul porozității unor piese realizate prin turnare, ([80]) parametrul porozitate poate fi determinat măsurând debitul unui fluid ce trece prin porii materialului în anumite condiții precizate. Pentru o valoare scăzută a porozității se utilizează un fluid cu vâscozitate scăzută, de preferință un gaz, cel mai la îndemână fiind aerul.

Concret, problema s-a pus la controlul porozității chiulaselor motoarelor cu ardere internă, obținute prin turnarea aluminiului sub presiune și prelucrate mecanic prin așchiere pe o linie complet automatizată, ultimul post de control al liniei de fabricație având sarcina de a verifica dacă piesele gata prelucrate nu depășesc o anumită porozitate considerată ca limită admisibilă. Pneumatic această limită admisibilă se exprimă prin permisiunea ca prin întreaga suprafață controlată a piesei, supusă la o diferență de presiune a aerului de o atmosferă între cele două fețe 1 și 2 din figura 9.16, să nu treacă un debit de aer mai mare de $30\text{ cm}^3/\text{minut}$.

Pentru realizarea presiunii P_1 în interiorul piesei din figura 9.16, piesa se etanșează cu o flanșă care vine în contact cu ea numai pe suprafața 3. Flanșa este prevăzută cu un orificiu prin care se poate presuriza incinta astfel creată până la valoarea P_1 , presiunea P_2 fiind de fapt presiunea atmosferică.

În figura 9.17 este prezentat principiul pneumatic de măsură a debitului de aer ce trece prin porii piesei de controlat.

Secvența de comandă a electroventilelor și curbele presiunii și temperaturii aerului în piesa de controlat și în piesa de volum echivalent sunt prezentate în figura 9.18.

9.4.1 Funcționarea schemei pneumatice

La momentul de timp t_0 când toate electroventilele sunt închise, o piesă de controlat P este poziționată automat, etanș, peste flanșa cu orificiu formând incinta despre care s-a vorbit. La momentul de timp t_1 , electroventilele V_1 , V_2 , și V_2' , se deschid, aerul de presiune P_1 , de la sursa de presiune constantă S.P. pătrunzând atât în incinta piesei de probă P cât și într-o incintă de volum echivalent V.E. neporoasă. După timpul τ_1 când presiunea în tot sistemul pneumatic s-a stabilizat la valoarea P_1 , electroventilul V_1 , se închide urmând o perioadă de timp τ_2 în care se obține și stabilizarea termică a ansamblului. În a II-a parte a perioadei de timp τ_2 electroventilul V_3 se deschide introducând în circuit și traductorul magnetofluidic T.Mf.. Totuși acesta este scurtcircuitat pneumatic până la momentul de timp t_4 când electroventilele V_2 și V_2' se închid. În intervalul de timp următor notat cu τ_3 , datorită porozității piesei P, o parte din aerul din incinta sa trece prin pori ieșind în exterior.

Pentru egalizarea presiunii între P și V.E., din incinta V.E. un volum de aer egal cu jumătate din cel ieșit prin pori trece în incinta P prin traductorul T.Mf.. Suma volumelor incintelor și a circuitului pneumatic este mult mai mare decât volumul de aer scăpat prin pori astfel că pe toată perioada de timp $\tau_2 + \tau_3$, presiunea P_1 în întreg lanțul pneumatic este practic constantă. Deci pe durata de timp τ_3 traductorul notat cu T.Mf. măsoară o mărime proporțională cu volumul de aer scăpat prin porii piesei P.

La momentul de timp t_5 , electroventilul V_3 se închide protejând traductorul T.Mf. și în momentul imediat următor electroventilele V_2 , V_2' și V_4 se deschid permițând depresurizarea sistemului pneumatic. După momentul de timp t_7 când sistemul pneumatic este complet depresurizat, se închid toate electroventilele, piesa P este îndepărtată automat și o altă este adusă în locul ei pentru control urmând același ciclu. Electroventilele V_3 și V_2' se montează fizic lângă T.Mf..

Dacă în perioada de timp τ_3 traductorul T.Mf. sesizează o pierdere de aer prin porii piesei P mai mare decât cea admisă, piesa este marcată automat fiind considerată rebut și dirijată la retopire.

9.4.2 Utilizarea traductorului de presiune diferențială pentru gaze

Măsurarea volumului de aer trecut prin porii piesei P se poate face în mod indirect, transformându-l în diferență de presiune, prin utilizarea pe poziția indicată în figura 9.17 cu T.Mf., a unui traductor magnetofluidic de presiune diferențială pentru gaze (fig. 9.19). Acesta este format în principal dintr-un tub în formă de U în care la echilibru se află lichid magnetic până la jumătate din lungimea brațelor sale verticale.

În jurul fiecăreia dintre ramurile verticale ale tubului U este amplasată câte o bobină electrică cu bobinaj uniform (L_1 și L_2). La apariția unei diferențe de presiune între prizele 1 și 2 ale tubului U, lichidul magnetic se denivelează iar bobinele L_1 și L_2 își modifică inductanțele. Un amplificator electronic de măsură sesizează diferența de inductivitate $L_2 - L_1$ care este direct proporțională cu diferența de presiune de la prizele de presiune ale traductorului.

Legarea traductorului diferențial de presiune în circuitul pneumatic din fig. 9.17 se face astfel încât o priză a sa (de exemplu priza 2) se află spre piesa de probă P iar cealaltă priză (priza 1) se află spre piesa de volum echivalent V.E.. În perioada timpului de

măsurare τ_3 , datorită pierderilor de aer prin porii piesei P, presiunea gazului la priza 2 a T.Mf. scade față de presiunea la priza 1, lichidul magnetic se denivelează, L_2 crește și L_1 scade. În funcție de denivelarea maximă (diferența maximă de inductivitate $\Delta L = L_2 - L_1$) la care se ajunge după timpul τ_3 , piesa de controlat este declarată sau nu rebut.

Avantajele utilizării unui traductor diferențial de presiune cu lichid magnetic în locul altor tipuri de traductoare (de exemplu cu lichid opac și fotocelulă), sunt pe de o parte cel al rezoluției deosebit de bune pe care o are acest tip de traductor, iar pe de altă parte faptul că traductorul cu lichid magnetic furnizează la ieșire semnal electric analogic proporțional cu diferența de presiune, semnal ce permite prelucrarea instantanee după dorință.

Deși poate fi utilizat cu succes în această aplicație, traductorul prezentat (ca de altfel orice tip de traductor care separă complet volumul de gaz din P față de cel din V.E. după închiderea electroventilelor V_2 și V_2') are dezavantajul captării unor eventuale diferențe de presiune parazite într-un sens sau altul, ce pot apare la închiderea electroventilelor V_2 și V_2' (momentul de timp t_4). Aceste mici diferențe de presiune parazite se suprapun peste cea utilă iar pentru eliminarea ponderii lor este necesar ca timpul de măsurare τ_3 să fie suficient de lung.

9.4.3 Utilizarea detectorului de debit de scăpări magnetoflu-idic

Detectorul de debit de scăpări măsoară direct debitul de aer ce scapă prin porii materialului, fiind de fapt un debimetru cu lichid magnetic construit special pentru această aplicație. Principiul lui de funcționare este prezentat în figura 9.20. El este compus dintr-un traductor diferențial de presiune cu lichid magnetic compensat static și dinamic la influența înclinațiilor și accelerațiilor asupra măsurătorilor și un tub de măsură prin care trece debitul de măsurat Q' . La trecerea debitului de gaz Q' prin tubul de măsură, traductorul diferențial de presiune cu lichid magnetic format din bobinele L_1 și L_2 măsoară căderea de presiune pe care o înregistrează gazul între cele două prize de presiune, în curgere laminară. Această cădere de presiune este liniară și direct proporțională cu debitul Q' . Bobinele L_1 și L_2 își modifică inductanța atât la apariția unui debit de gaz prin tubul de măsură cât și la înclinația ansamblului în jurul axei Oy. Bobinele L_1' și L_2' își modifică inductanța numai la înclinația în jurul axei Oy, astfel încât diferența de inductivitate

$$\Delta L = L_2 + L_1' - L_1 - L_2' \quad (9.1)$$

este zero la înclinația ansamblului în jurul axei Oy și diferită de zero doar la apariția unui debit de gaz Q' .

Compensarea traductorului diferențial de presiune cu lichid magnetic la influența înclinațiilor, cu ajutorul clinometrului cu lichid magnetic (L_1' și L_2'), este obligatorie deoarece diferențele extrem de mici de presiune ce se măsoară în acest caz (de ordinul sutimilor de mm coloană H_2O), pot fi ușor confundate cu înclinațiile de ordinul secundelor de arc ce pot apare în timpul funcționării.

Legarea în circuitul pneumatic al detectorului de debit de scăpări se face astfel încât un capăt al tubului de măsură (de exemplu capătul 1) să fie spre V.E. iar celălalt capăt spre P.

La închiderea electroventilelor V_2 și V_2' (V_3 fiind deja deschis), jumătate din debitul de

aer ce trece prin porii piesei P spre exterior, vine din volumul echivalent V.E. prin tubul de măsură al detectorului, putând fi măsurat.

Revenind la secvența de comandă a electroventilelor din figura 9.18, deoarece detectorul nu realizează o separare a volumelor de gaz din cele două incinte, electroventilele V_2 și V'_2 pot fi închise înaintea expirării timpului de stabilizare (dar după deschiderea lui V_3 , deci între momentele de timp t_3 și t_4 de pe figura 9.18). În acest fel pe durata timpului de stabilizare τ_2 are loc și stingerea fenomenelor pneumatice tranzitorii datorate închiderii electroventilelor V_2 și V'_2 . Măsurarea acestor fenomene tranzitorii de către detector înaintea momentului de timp t_4 nu prezintă importanță deoarece citirea valorii debitului se face (în regim automat) în momentul t_4 . S-a reușit astfel eliminarea în totalitate a timpului de măsură τ_3 .

Detectorul de debit de scăpări, pe lângă afișarea în permanență a debitului de gaz momentan ce stăbate tubul de măsură și furnizarea la ieșire a unei tensiuni electrice proporționale cu acest debit, oferă și posibilitatea reglării și afișării electrice a unui prag de comparație între 0 și $50 \text{ cm}^3/\text{minut}$ (capătul de scală al detectorului), astfel că dacă debitul măsurat este sub pragul reglat, contactele unui releu accesibile spre exterior sunt deschise, iar, dacă debitul măsurat este peste pragul reglat, contactele respective se închid.

La momentul de timp t_4 , automatul programabil al liniei de fabricație testează starea contactelor releului și ia decizia corespunzătoare.

Deși a fost creat pentru o aplicație specială, detectorul de debit de scăpări cu lichid magnetic (sau traductorul diferențial de presiune cu lichid magnetic), se prezintă ca un instrument de măsură general pentru controlul porozității unor materiale.

Utilizatorul trebuie să stabilească forma flanșei de etanșare pentru piesa testată, volumul echivalent și să realizeze circuitul pneumatic din figura 9.17 cu secvențele de comandă din figura 9.18. Conform celor prezentate în capitolele anterioare, este posibilă fără modificări esențiale și detecția sau măsurarea în alte domenii de debit de gaz. Aspectul general al "*Detectorului de debit de scăpări - DDS-01*" este prezentat în figura 9.21 iar schemele electrice în figurile 9.22 și 9.23. Măsurătorile experimentale efectuate cu ocazia omologării produsului DDS-01, măsurători privind precizia (5%) și corecția la înclinare, sunt prezentate în [65].

9.5 Contorul de debit volumic pentru gaze

Se prezintă detaliile constructive și principiul de funcționare pentru un contor electronic, volumetric, bazat pe proprietățile lichidelor magnetice și fără piese mecanice în mișcare. Poate contoriza în ambele sensuri de curgere a gazului, în regim static sau în mișcare. Părțile componente ale contorului sunt senzorul, format din senzorul de presiune diferențială, senzorul de înclinare sau accelerare și tubul de măsură, și, sistemul electronic. Este descrisă corelația dintre partea hidraulică și cea electrică pentru eliminarea influenței înclinațiilor și accelerațiilor. Funcționarea părții electronice este explicată pornind de la schema bloc. Experiențele realizate demonstrează posibilitatea contorizării chiar a unor volume de gaz foarte mici, de 0.1 cm^3 la un debit de $50 \text{ cm}^3/\text{min}$. Contorizări în domenii de debit mai mare, peste $100 \text{ m}^3/\text{h}$, implică schimbarea numai a tubului de măsură, cu unul corespunzător domeniului cerut.

Contorul magnetofluidic pentru debite de gaze care se prezintă mai jos face parte din familia traductoarelor inductive cu lichid magnetic pentru mărimi aerodinamice.

9.5.1 Funcționarea sesizorului

1) *Construcția sesizorului:* Cele trei părți componente ale sesizorului sunt prezentate în figura 9.24 ([88]).

a) Sesizorul de presiune diferențială pentru gaze este format în principal dintr-un tub în formă de U, în care la echilibru se află lichid magnetic până la jumătate din înălțimea brațelor sale verticale. În jurul fiecăreia dintre ramurile verticale ale tubului U este amplasată câte o bobină electrică cu bobinaj uniform, inductanțele lor fiind L_1 și L_2 .

b) Sesizorul de înclinare este format dintr-un alt tub U, bobinele L'_1 și L'_2 și o altă masă de lichid magnetic. Tubul U, bobinele și lichidul magnetic al sesizorului de înclinare sunt identice cu cele de la sesizorul de presiune diferențială. Tubul U al sesizorului de înclinare este închis la parte de sus printr-un canal de comunicație pentru circulația aerului dintr-un braț în altul al tubului.

c) Tubul de măsură prin care trece debitul de gaz ce trebuie contorizat Q' , este plasat deasupra prizelor de presiune ale sesizorului de presiune diferențială. La trecerea debitului de gaz Q' prin tubul de măsură, sesizorul de presiune diferențială măsoară pierderea de presiune pe care o înregistrează gazul în curgere laminară, între cele două prize de presiune. Această pierdere de presiune este liniară și direct proporțională cu debitul Q' .

2) *Corecția la înclinare/accelerare:* Bobinele L_1 și L_2 își modifică inductanța atât la apariția unui debit de gaz prin tubul de măsură cât și la înclinația ansamblului în jurul axei Oy din figura 9.24. Bobinele L'_1 și L'_2 își modifică inductanța numai la înclinația în jurul axei Oy, astfel încât diferența de inductivitate

$$\Delta L = L_2 + L'_1 - (L_1 + L'_2)$$

este zero la înclinația ansamblului în jurul axei Oy și diferită de zero doar la apariția unui debit de gaz Q' .

Legarea în circuitul electric a celor patru bobine ale sesizorului este prezentată în figura 9.25.

La apariția unei înclinații (acclerații) conform schemei din figura 9.25, suma inductanțelor corespunzătoare fiecărui braț al punții rămâne practic constantă. La trecerea unui debit de gaz Q' prin tubul de măsură, se deplasează numai coloana de lichid magnetic aferentă bobinelor L_1 și L_2 și puntea electrică se dezechilibrează. Se poate demonstra că în cazul acestor miezuri magnetice lichide, este posibilă măsurarea cu puntea electrică dezechilibrată iar aducerea la zero a tensiunii de la ieșirea sistemului electronic se poate face cu un singur element de reglaj rezistiv notat în figura 9.25 cu R_{adj} .

Compensarea sesizorului diferențial de presiune cu lichid magnetic la influența înclinărilor și accelerațiilor, cu ajutorul sesizorului de înclinare cu lichid magnetic, este obligatorie deoarece diferențele extrem de mici de presiune ce se măsoară în acest caz (de ordinul sutimilor de mm coloană H_2O) pot fi ușor confundate cu înclinațiile de ordinul secundelor de arc ce pot apare în timpul funcționării.

9.5.2 Funcționarea sistemului electronic

1) *Construcția sistemului electronic:* Schema bloc de funcționare a contorului este prezentată în figura 9.26.

Puntea de măsură B, este alimentată cu o tensiune armonică de 5 KHz furnizată de oscilatorul OSC. Tensiunea armonică dintre punctele P_1 și P_2 ale punții din figura 36 este

amplificată într-un bloc de amplificare de curent alternativ AMP(ac) și redresată în fază cu tensiunea oscilatorului, în blocul PR. La ieșirea acestuia se obține o tensiune continuă, care, amplificată într-un amplificator de curent continuu AMP(dc), reprezintă o mărime electrică proporțională cu debitul de gaz instantaneu Q' . Această tensiune este prelucrată pe de o parte de convertorul analog-numeric ADC și afișată de către Flow D, iar pe de altă parte generează o frecvență proporțională cu valoarea ei prin intermediul convertorului tensiune-frecvență VCO. Frecvența de ieșire din blocul VCO fiind de valoare mare este divizată în prealabil de blocul divizor de frecvență FD, după care impulsurile rezultate sunt contorizate de numărătorul zecimal BCD-CU. Conținutul numărătorului zecimal este decodificat prin DEC la 7 segmente și afișat de către Vol. D.

Este foarte utilă stabilirea unui prag minim pentru debitul de gaz de la care se autorizează contorizarea lui. Această funcție este îndeplinită de blocul autorizare-contorizare CA.

Ștergerea voită a conținutului numărătorului și divizorului de frecvență la acționarea lui K_1 este asigurată de blocul RST. Tot RST, comandat de temporizatorul T asigură ștergerea conținutului numărătorului și divizorului de frecvență imediat după punerea sistemului electronic sub tensiune.

Valoarea amplificărilor de tensiune se stabilește astfel încât blocurile Flow D și Vol. D să afișeze în unitățile de volum dorite.

2) *Câteva relații de funcționare:* Se demonstrează în [48, 49] că dacă privim cele două brațe inductive ale punții din figura 9.25 ca impedanțe, reactanțele inductive ale lor pot fi scrise sub forma:

$$X_1 = X(1 - \alpha') \quad X_2 = X(1 + \alpha'), \quad (9.2)$$

unde pentru lichide magnetice uzuale $-0.1 \leq \alpha' \leq +0.1$.

Valoarea tensiunii medii redresată în fază de la ieșirea blocului AMP(dc) din figura 9.26 este:

$$U_{AB\ med}(\alpha', Q, \beta') = \frac{U\sqrt{2}}{\pi} \frac{Q}{1 + Q^2} (Q \cdot \cos\beta' - \sin\beta')(\alpha' - \alpha_1), \quad (9.3)$$

unde U este valoarea efectivă a tensiunii armonice care alimentează puntea, Q este factorul de calitate al bobinelor, α_1 este valoarea lui α' la care s-a făcut aducerea la zero a tensiunii de ieșire, iar, β' este unghiul de defazaj dintre tensiunea de alimentare a punții și tensiunea de comandă a blocului de redresare în fază PR. În (9.3) toate amplificările s-au considerat egale cu unitatea.

Concluziile rezultate în urma acestei analize sunt interesante prin aceea că aducerea la zero a tensiunii $U_{AB\ med}$ este posibilă în orice condiții dintr-un singur element de reglaj rezistiv, nu se justifică eforturi deosebite pentru realizarea unor bobine cu factor de calitate mai mare decât 3 și unghiul optim de comandă în fază a redresării (β') este diferit de zero.

Precizia de contorizare este dată de precizia convertorului tensiune-frecvență VCO din figura 9.26. Prototipul construit pentru un debit de aer la capăt de scală de $50\text{cm}^3/\text{min}$, a utilizat un convertor tensiune-frecvență de precizie mai bună de 0.1% și a demonstrat posibilitatea contorizării în condiții foarte bune a unor volume de gaz de 0.1cm^3 . (Prin proiectare cea mai puțin semnificativă cifră a blocului Vol. D a fost pentru zecimi de cm^3 .)

În cazul contorizării unor debite de gaz de alt ordin de mărime, construcția sistemului electronic rămâne identică. În construcția sesizorului se schimbă doar tubul de măsură prin care trece debitul de gaz Q' .

Sistemul electronic minimal realizat pentru prototip (fig. 9.26) permite contorizarea într-o singură direcție dar sesizorul prezentat este bidirecțional. Adaptarea sistemului electronic pentru o contorizare bidirecțională este ușor de realizat.

Contorul electronic cu lichid magnetic cu sesizorul compensat la înclinare oferă posibilitatea utilizării lui atât în regim static cât și dinamic (cu înclinația și accelerația în orice direcție, între anumite limite).

Principiul de funcționare hidraulic prezentat în figura 9.24, permite contorizarea debitului de gaz indiferent de sensul de curgere. Sistemul electronic minimal din figura 9.26 contorizează numai sensul dorit. Printr-o completare adecvată se pot contoriza și prelucra numeric ambele sensuri de curgere a gazului.

Aspectul general al contorului este prezentat în figura 9.27, schema electrică de detaliu în figura 9.28 și schema electrică de alimentare în figura 9.29. Figurile 9.30 . . . 9.35 prezintă modalitatea de realizare fizică a plăcilor electronice aferente.

Ca aplicații tipice pentru contorul electronic sunt:

- măsurarea (înregistrarea) consumului de gaz casnic s-au industrial;
- supravegherea automată a rețelei de distribuție a gazelor;
- controlul mediului, etc.

9.6 Modularizarea familiei de traductoare inductive cu lichid magnetic pentru mărimi aerodinamice și înclinare

Având în vedere cele prezentate în capitolele anterioare, cât și experimentarea prototipurilor realizate până în prezent, rezultă clar posibilitatea fabricării sistemelor electronice (destinate unor traductoare diferite ca aplicație și caracteristici) într-o structură modulară, realizată din plăci electronice de același tip, care să echipeze toate sistemele electronice destinate traductoarelor magnetofluidice inductive pentru mărimi aerodinamice și înclinare. O proiectare de acest gen avantajează producția atât în situația unor comenzi diversificate cât și în ceea ce privește punerea în funcțiune și depanarea.

În continuare, analiza unei astfel de structuri se face inițial în cazul piezometrului (traductorul diferențial de presiune în gaze), urmând să se precizeze pe rând diferențele în cazul altor aplicații.

În funcție de spațiul disponibil, o parte din aceste module se pot amplasa în carcasa traductorului, iar celelalte module într-o cutie separată. Soluția optimă de amplasare din punct de vedere electric ar fi introducerea părții de curent alternativ în carcasa traductorului. Sursele de alimentare, amplificatorul de curent continuu cu circuitele de comutare a amplificării, dispozitivele și circuitele de afișare, precum și circuitele specifice fiecărei aplicații în parte se recomandă a fi amplasate într-o cutie separată. În acest fel, pe cablul de legătură dintre traductor și cutia de alimentare vor fi numai curenți continui și modificarea parametrilor electrici ai cablului, la diverse manevre sau în timp, nu va duce la dezechilibrarea punții de măsură și implicit la erori de măsurare.

Ca semnal electric analogic de ieșire se propune o tensiune de $\pm 5V$, deoarece toate circuitele integrate utilizate pot fi alimentate la $\pm 7,5V$.

9.6.1 Traductorul de presiune diferențială

A. Oscilatorul. S-a ales o frecvență de lucru de 5KHz deoarece utilizarea unei frecvențe de lucru mai mari ar implica măsuri speciale de ecranare, iar utilizarea unei frecvențe de lucru mai mici ar duce la dimensiuni mai mari ale bobinelor traductorului. Schema utilizată este cea de oscilator în 3 puncte de tip Colpitts în montaj cu emitor comun ([89]). (Fără alte precizări, notațiile folosite se referă la figura 9.22: "Detector de debit de scăpări - DDS-01. Schema electrică generală."). După cum rezultă din capitolul 8, stabilitatea amplitudinii oscilațiilor influențează direct proporțional precizia de măsurare. Din acest motiv, față de schema clasică s-a adăugat tranzistorul J-FET notat cu T_1 , precum și o stabilizare a amplitudinii oscilațiilor prin intermediul diodelor. Chiar și fără aceste măsuri de prevedere, schema clasică asigură o stabilitate foarte bună a amplitudinii oscilațiilor ($5 \cdot 10^{-5}/^{\circ}C$)[90].

În cazul în care se dorește o stabilizare deosebită la variația temperaturii exterioare, tranzistorul bipolar și diodele pot fi cele din structura CI A 726 (notat pe schemă cu I_1)[91, 92]. În acest caz pentru termostatarea integratului ($\Delta t = 2^{\circ}C$) este necesară alimentarea lui la $\pm 15V$. Performanțe similare s-ar putea obține și prin utilizarea unui oscilator în punte cu stabilizare termică de amplitudine ([91]) sau prin generarea numerică a semnalului sinusoidal și folosind apoi performanțele circuitului integrat DAC-08 M.

Tot pe placa oscilator se recomandă a fi plasat și amplificatorul I_2 (A 741) precum și transformatorul separator TR1.

B. Reglajul "zero brut". În cazul dotării sistemului electronic cu afișaj numeric (de 3 și 1/2 cifre), pentru ca aducerea la zero a ultimei cifre a afișajului să poată fi făcută din potențiometrul de reglaj cu o siguranță acceptabilă, se impune ca plaja de reglaj a potențiometrului să fie redusă. În acest caz, dacă se dorește măsurarea unei diferențe mici de presiune în jurul unei anumite presiuni (cazul controlului dimensional), aducerea la zero a sistemului de măsură la presiunea respectivă nu mai este posibilă din potențiometrul de reglaj fin. Este necesară utilizarea unui etaj de reglaj "zero brut" și a unui potențiomtru multitur, sau, utilizarea a două etaje de reglaj "zero brut" și un potențiomtru obișnuit (270°). (Punțile IEMI sunt dotate cu două reglaje "zero brut", fiecare cu 12 trepte.)

În schema prezentată, un etaj permite extinderea domeniului de reglaj zero de 8 ori, iar două etaje permit extinderea de 64 ori. Cuplarea celor două etaje se face legând intrarea celui de-al doilea etaj la ieșirea 1-17 a primului etaj și potențiometrul de reglaj fin la ieșirea 1-17 a celui de-al doilea etaj. Pe cel de-al doilea etaj, rezistențele R_8 și R_9 se ștrapează obligatoriu.

Utilizarea în cascadă a circuitului integrat cu multiplexare-demultiplexare MMC 4097 (I_3) ([93, 94]), oferă posibilitatea aducerii la zero în regim automat, fără intervenția operatorului. (În acest caz, decodificatoarele cu diode $D_1 \dots D_9$ pot să lipsească, comanda făcându-se în cod octal codificat binar.)

C. Amplificatorul de curent alternativ. Din punct de vedere al stabilității termice este de dorit ca amplificarea în curent alternativ să fie maxim posibilă, iar amplificarea în curent continuu să fie cât mai mică. Practic, cele două impedanțe ale traductorului cu

lichid magnetic nu sunt perfect egale, puntea nu este echilibrată și tensiunea alternativă de la intrarea acestui modul nu este nulă. În consecință, amplificarea în curent alternativ nu poate fi prea mare deoarece lanțul de amplificatoare operaționale ar intra în limitare. Experimental s-a constatat că două operaționale (I_7 și I_8 de tipul M 108A) satisfac orice aplicație. Proiectarea acestui lanț de amplificare se face astfel încât funcția de transfer să prezinte un palier în jurul frecvenței de lucru.

Tot pe acest modul se recomandă a fi plasat și redresorul sensibil la fază (I_5, I_6) ([95], pag.269) precum și amplificatorul limitator pentru formarea semnalului pilot, realizat cu I_4 (ROB 101).

D. Amplificatorul de curent continuu. Integratele I_9, I_{11}, I_{12} realizează un simulator de amplificator de instrumentație cu câștig reglabil în trepte prin intermediul lui I_{10} ([96, 97]). Dacă nu se doresc mai multe domenii de măsură, prezența acestui modul este necesară numai când amplificarea în tensiune alternativă de pe modulul anterior nu este suficientă. Dacă se doresc mai multe domenii de măsură, prezența acestui amplificator este obligatorie. Reglarea amplificărilor pe domeniile cerute se face independent de celelalte circuite. Dacă numărul de domenii cerut este mai mare de 4, se utilizează un lanț de comutație cu MMC 4066 (Intrările 1,4,8,11 se leagă împreună.). Problema unui număr mai mare de 4 domenii apare numai la piezometru, când se cere afișare analogică și nu se acceptă afișare numerică. Utilizarea CI MMC 4066 permite comutarea domeniilor de măsură în regim automat, fără intervenția operatorului. În acest caz comanda circuitului se face în cod zecimal codificat binar.

9.6.2 Clinometrul unidirecțional

Modulele sunt similare piezometrului, cu excepția reglajului "zero brut" care nu se justifică. Prezența acestui reglaj ar putea eventual ușura aducerea în parametri la fabricație, nemaifiind necesară tatonarea (ajustarea) rezistențelor R_8, R_9 pentru aducerea la zero.

Atât acest reglaj, cât și reglajul potențiometric de zero, în cazul clinometrelor nu se scot pentru accesul utilizatorului.

În general, amplificarea de ansamblu a clinometrelor este cel puțin cu un ordin de mărime mai mare decât cea a piezometrelor.

9.6.3 Debitmetrul. Detectorul DDS-01

Modulele sunt similare piezometrului, cu excepția reglajului de "zero brut", care nu se justifică. Prezența acestui reglaj ar putea folosi eventual la aducerea la zero în regim automat. Utilizatorul trebuie să aibe acces la reglajul de zero fin.

Amplificarea generală a debitmetrelor este cel puțin cu două ordine de mărime mai mare decât cea a piezometrelor.

Detectorul DDS-01 este un debitmetru dotat suplimentar cu un potențiometru (P_2), un integrat (I_3) pentru fixarea unui prag de tensiune și un comparator cu histereză (I_2) care anclanșează un releu în cazul când debitul măsurat îl depășește pe cel prescris.

9.6.4 Contorul de gaz cu totalizator electronic

Modulele sunt aceleași ca și la debitmetru. Amplificatorul de curent continuu, deși este necesar (amplificarea în alternativ este sigur insuficientă), nu poate oferi comutarea de domenii deoarece ar necesita circuite suplimentare pentru modificarea conținutului numărătorului. Deoarece afișarea debitului este facultativă, contorul de gaz este prevăzut cu un comparator cu histereză (I_{14} - fig. 9.28), care, prin intermediul a două LED-uri permite reglarea zeroului electric înainte de începerea contorizării.

În vederea evitării contorizării permanente (la debite de gaz infime), contorul este dotat cu un alt comparator cu histereză (I_{13}) care blochează contorizarea dacă debitul de gaz scade sub un prag reglabil din R_{48} .

Funcționarea contorizării se bazează pe transformarea semnalului analogic corespunzător debitului în impulsuri cu frecvența proporțională cu semnalul de debit (I_{15})[98]. Această frecvență este divizată după dorință (I_{16}, I_{17}) și apoi impulsurile sunt contorizate de un lanț de numărătoare ($I_1 \dots I_7$). Conținutul numărătoarelor este decodificat în permanentă (de $I_{14} \dots I_{20}$) și afișat. Circuitele $I_8 \dots I_{13}$ folosesc la ștergerea zerourilor inutile de la afișare. Temporizatorul I_{18} aduce la zero conținutul numărătorului imediat după conectarea sub tensiune.

9.6.5 Clinometrul bidirecțional

Partea electronică este de fapt de două ori partea electronică a clinometrului unidirecțional. Excepție face oscilatorul, care este suficient într-un singur exemplar, cu precizarea că transformatorul TR1 se execută cu trei secundare identice pentru realizarea separării galvanice între circuitele traductoarelor de pe cele două direcții.

9.7 Observații

- Deși la unele aplicații (piezometru) comutarea domeniilor de măsură ar fi posibilă și pe partea de tensiune alternativă, se evită acest lucru ca urmare a modificării poziției punctului de zero în momentul comutării.
- Reglajul general de offset se face din R_{35} punând intrările 1 și 12 ale lui I_5 la masă și măsurând tensiunea la ieșirea lui I_{12} pe domeniul maxim de amplificare a amplificatorului de tensiune continuă.
- Reglarea amplificatorului de tensiune alternativă se face în montaj, astfel ca I_8 să nu intre în limitare indiferent de poziția lichidului magnetic.
- Puterea electrică necesară funcționării unei scheme minime (fără termostatare și cu afișare analogică) este sub 0,5 W.
- Este demnă de remarcat posibilitatea comutării punctelor de măsurare aerodinamică, prin metode neelectrice, cu lichid magnetic ([99]) și folosirea unui singur traductor.

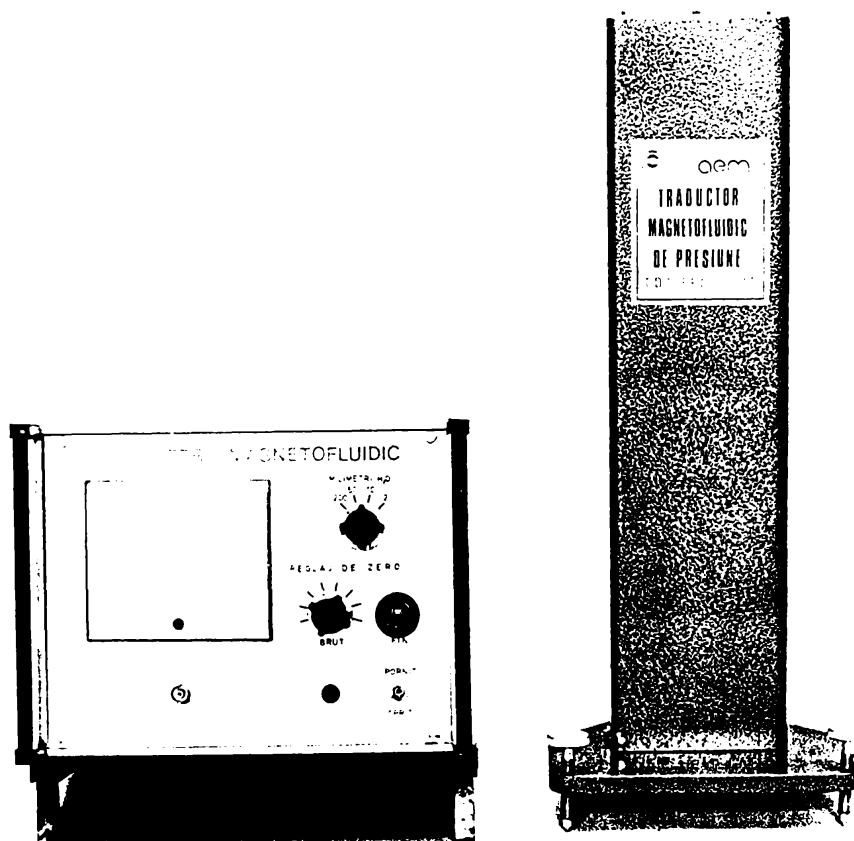


Figura 9.1: Traductor diferențial de presiune pentru gaze (model experimental). Vedere de ansamblu a senzorului și sistemului electronic.

Figura 9.2: Traductor diferențial de presiune pentru gaze (model experimental). Schema electrică generală.



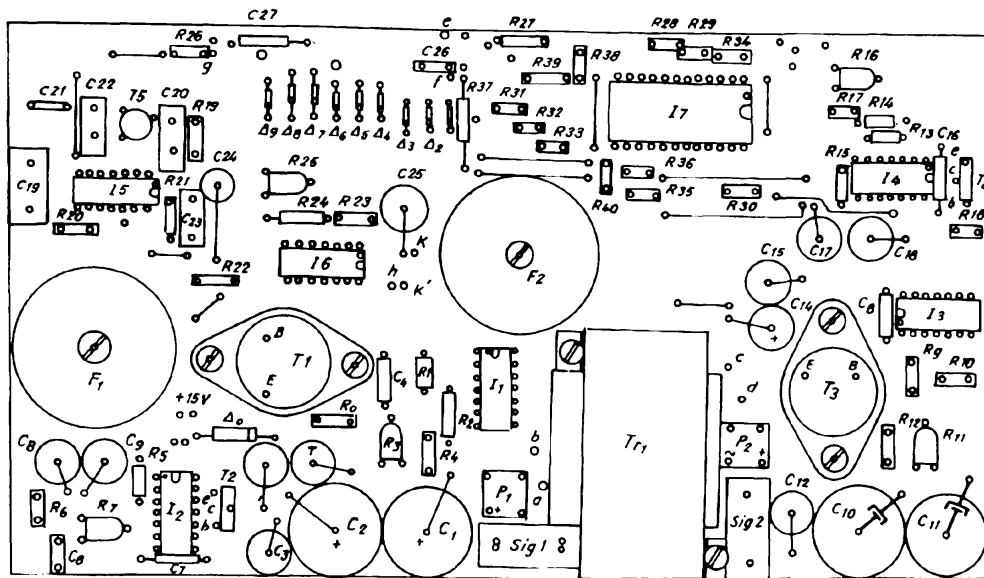


Figura 9.3: Traductor diferențial de presiune pentru gaze (model experimental). Placa 1 - fața plantată.

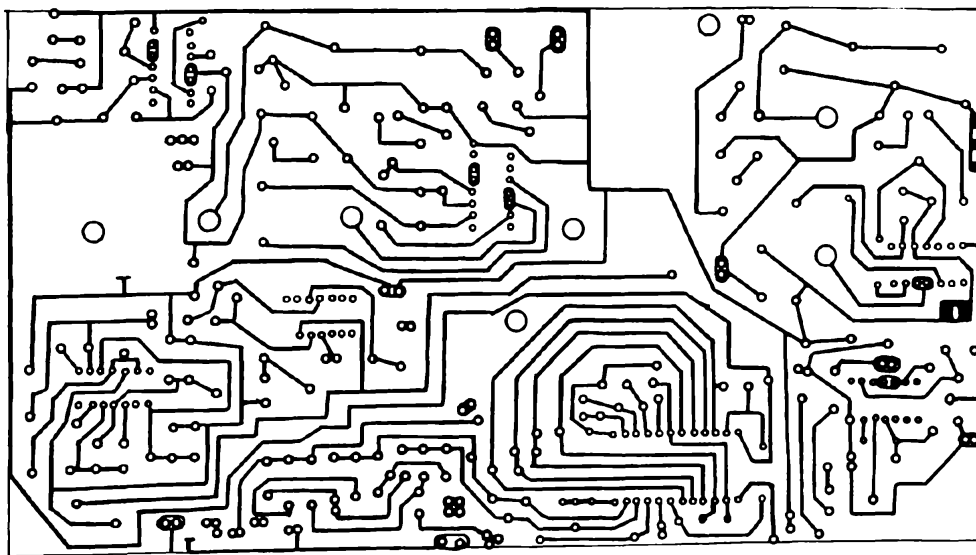


Figura 9.4: Traductor diferențial de presiune pentru gaze (model experimental). Placa 1 - fața cablată.

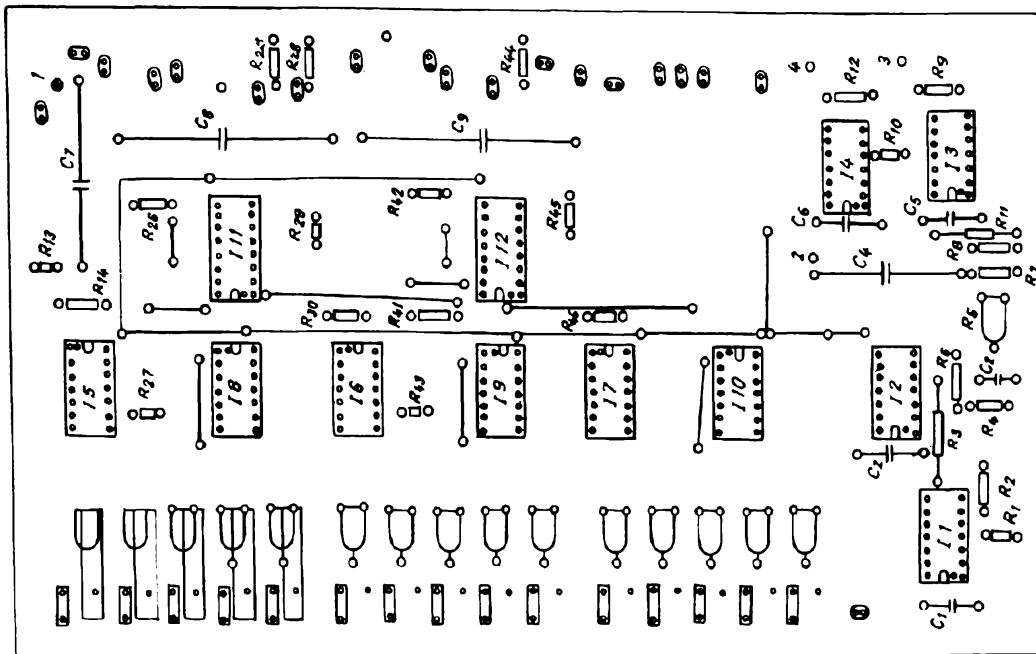


Figura 9.5: Traductor diferențial de presiune pentru gaze (model experimental). Placa 2 - fața plantată.

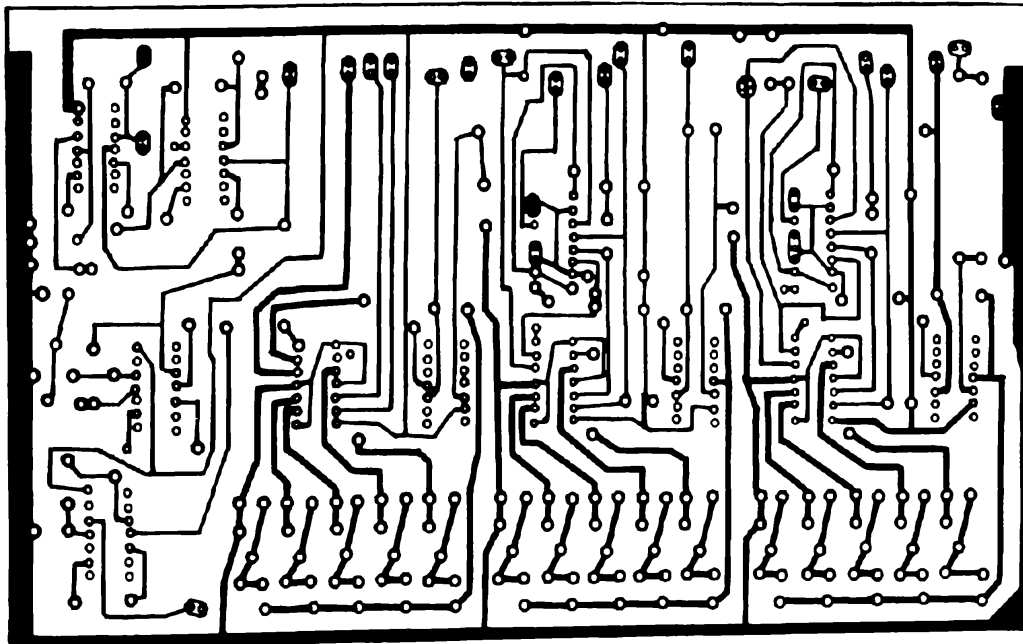


Figura 9.6: Traductor diferențial de presiune pentru gaze (model experimental). Placa 2 - fața cablată.

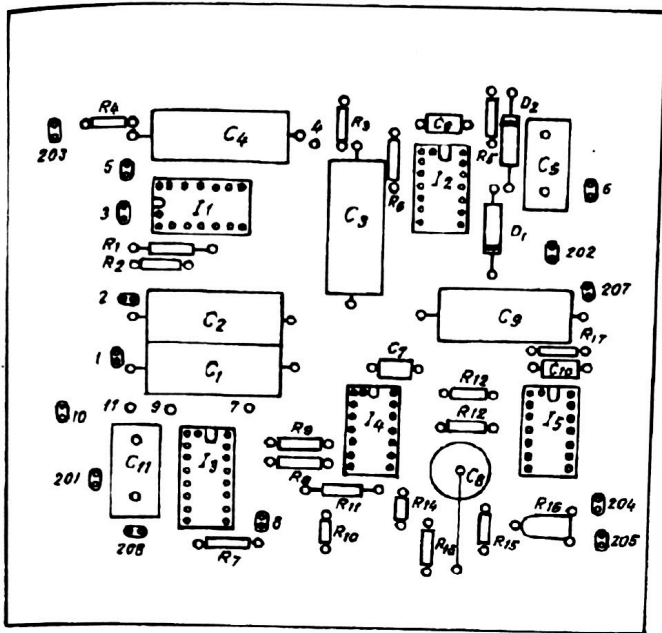


Figura 9.7: Traductor diferențial de presiune pentru gaze (model experimental). Placa 3 - fața plantată.

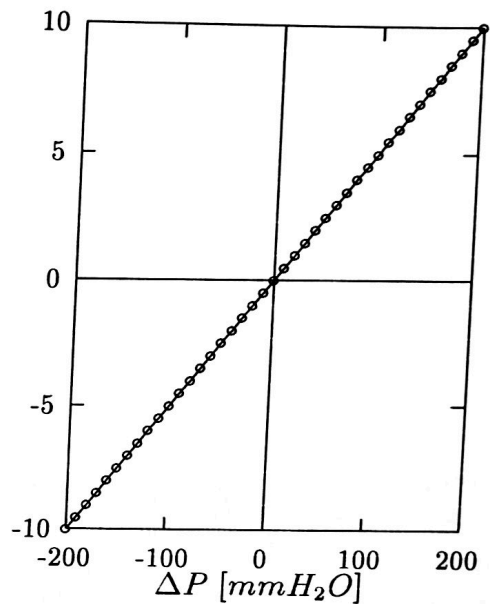


Figura 9.9: Verificarea experimentală a traductorului diferențial de presiune în gaze (model experimental). Tensiunea de ieșire (în V_{cc} pe ordonată) în funcție de diferența de presiune în mmH_2O pe abscisă).

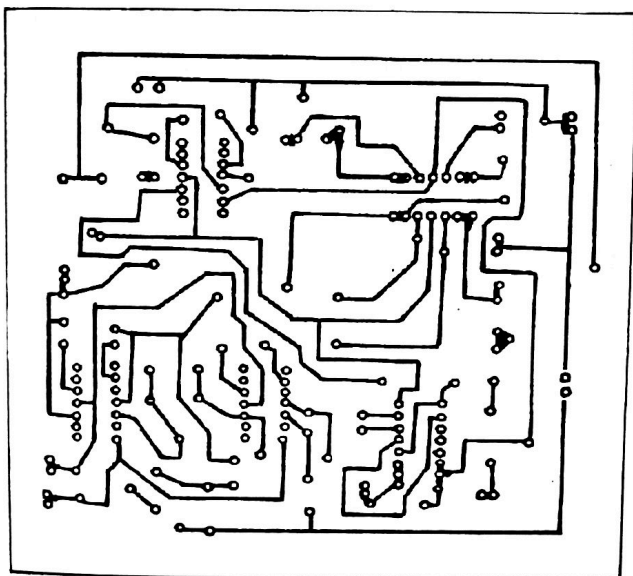


Figura 9.8: Traductor diferențial de presiune pentru gaze (model experimental). Placa 3 - fața cablată.

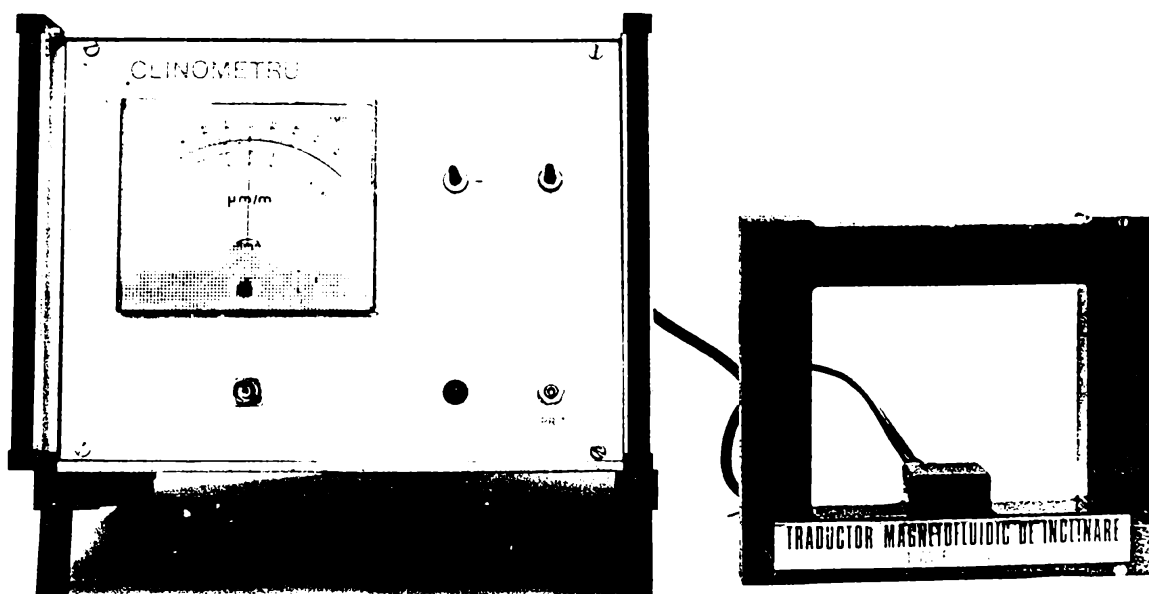


Figura 9.10: Traductor diferențial de înclinare unidirecțional. Vedere de ansamblu a sesizorului și sistemului electronic

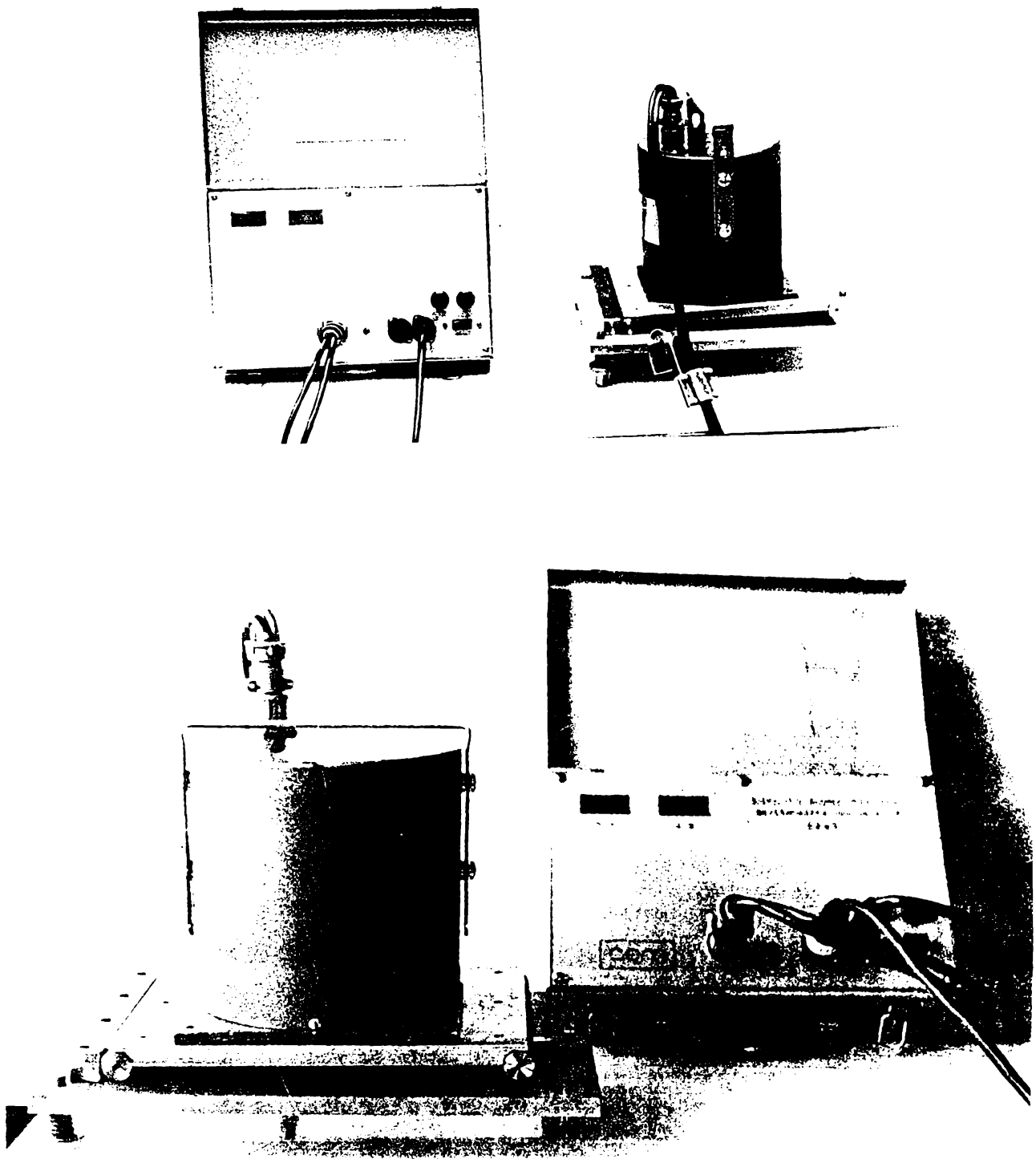


Figura 9.11: Traductor diferențial de înclinare bidirecțional. (Produs omologat sub numele de "Dispozitiv Bidirecțional de Determinare a Orizontalității - DBDO-01")

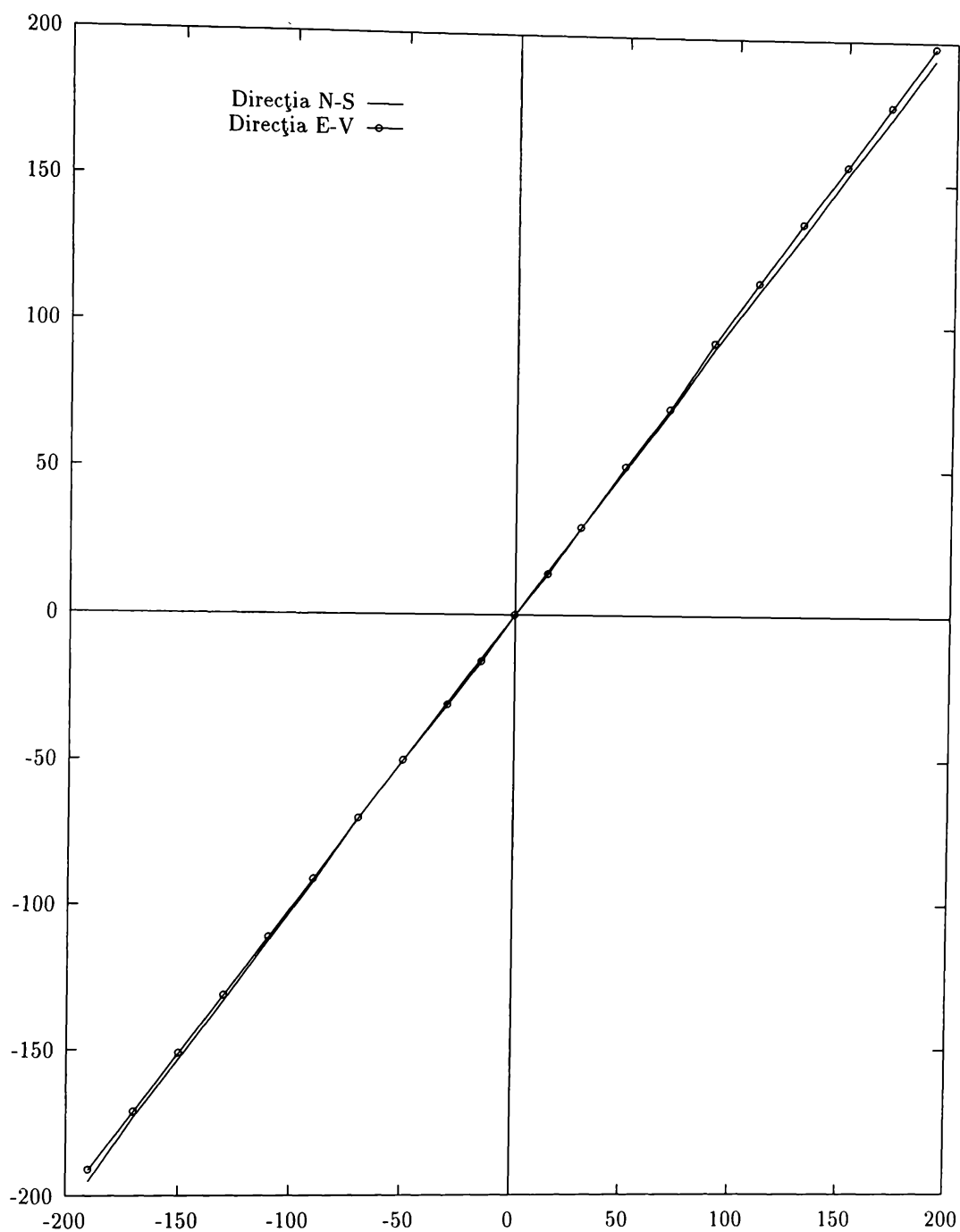


Figura 9.12: Verificarea experimentală a Dispozitivului Bidirecțional de Determinare a Orizontalității DBDO-01. (Unitățile de măsură sunt minute hexagesimale.)

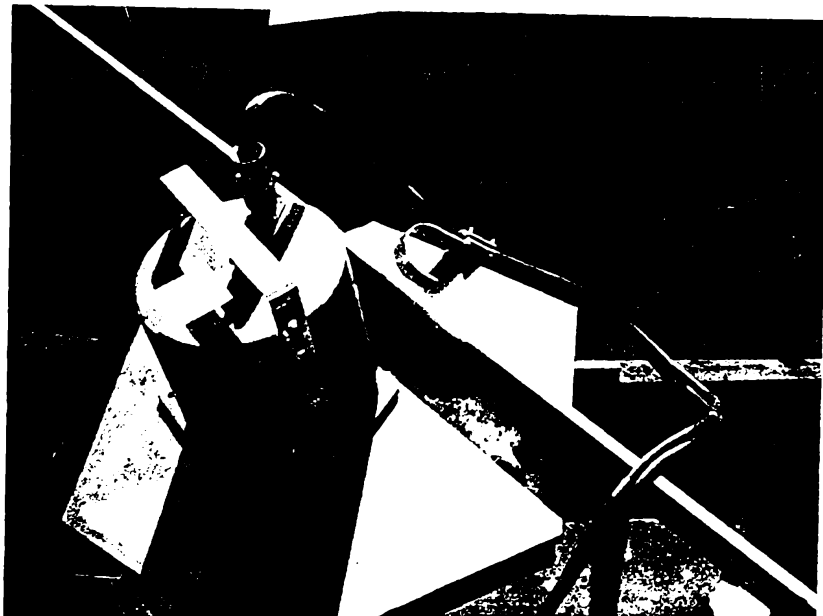
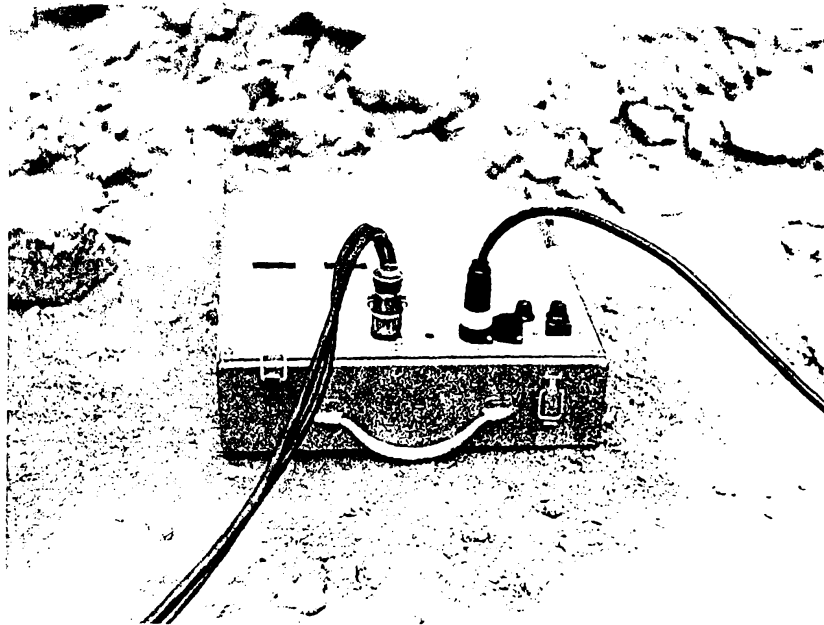


Figura 9.13: Utilizarea traductorului diferențial de înclinare bidirecțional la orizontalizarea agregatelor aeroelectrice de pe muntele Semenic

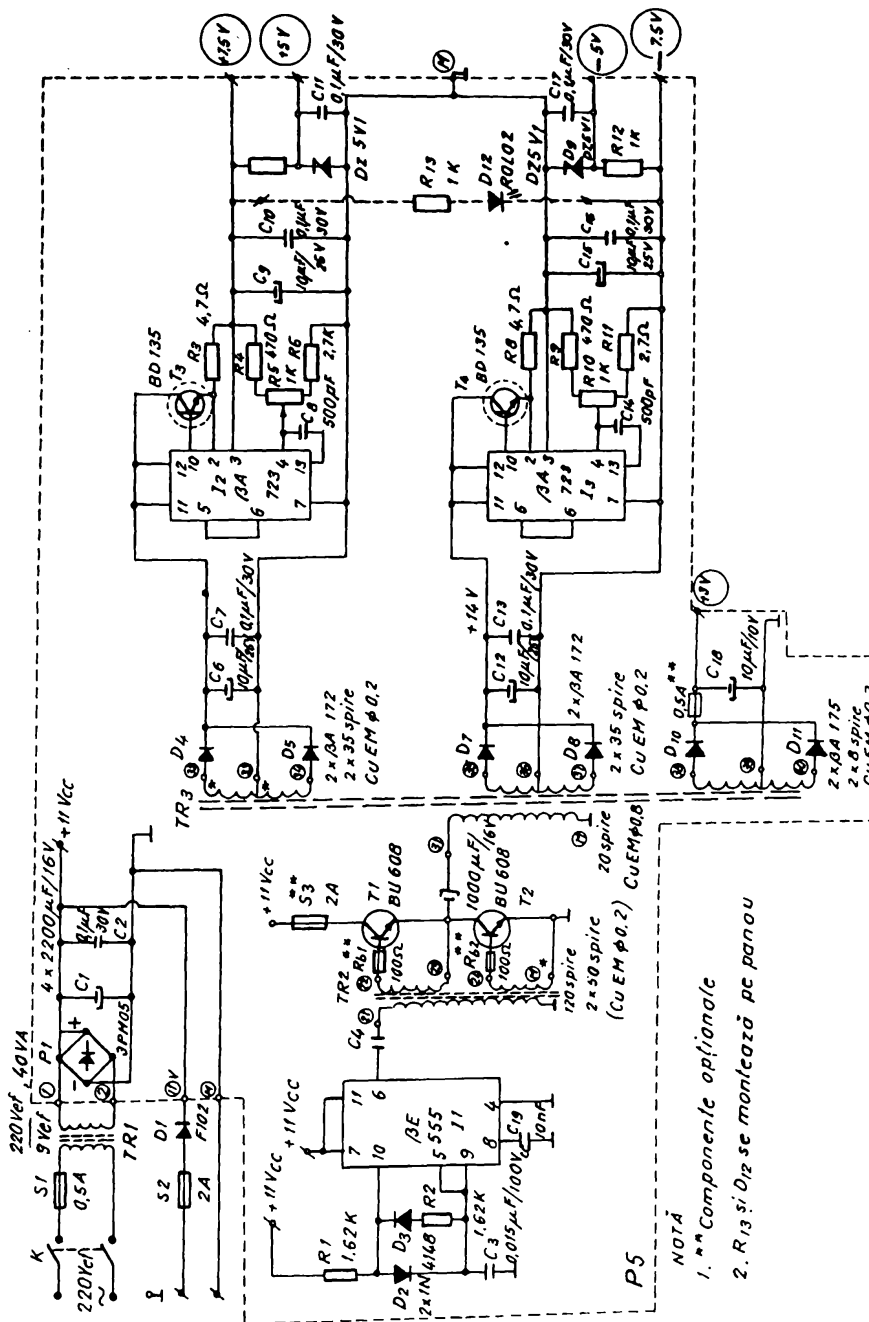


Figura 9.14: Schema electrică de alimentare a DBDO-01

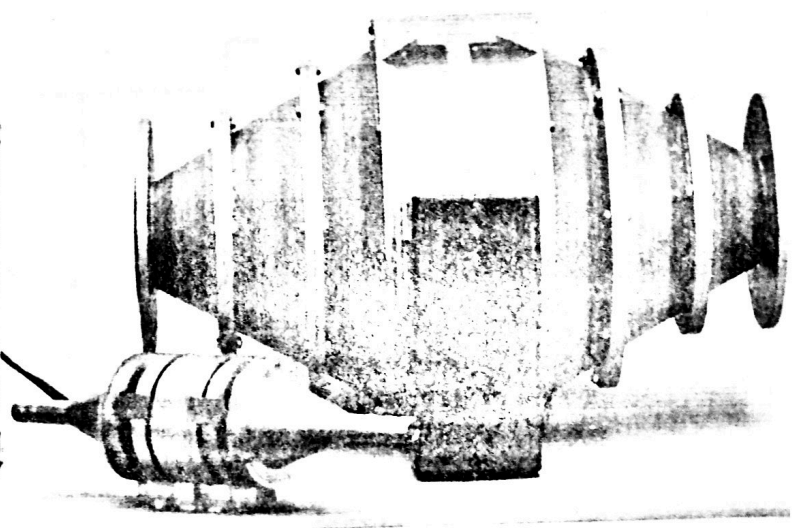
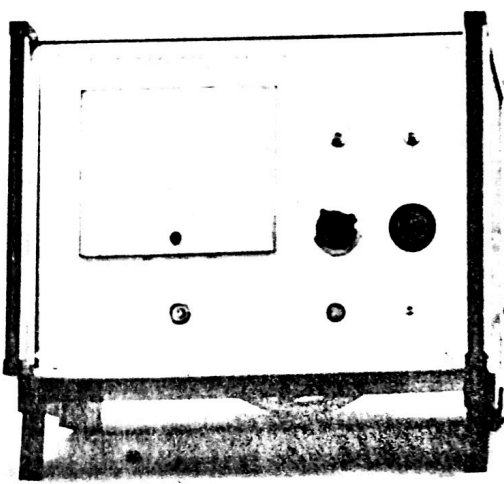
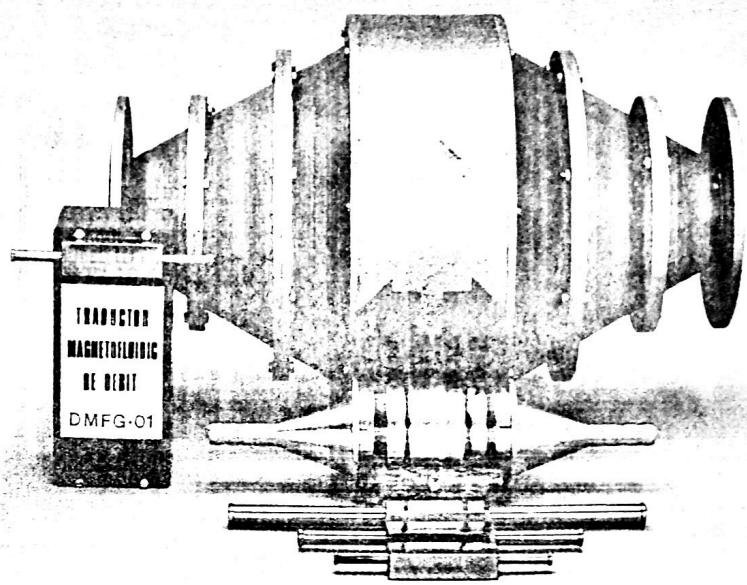
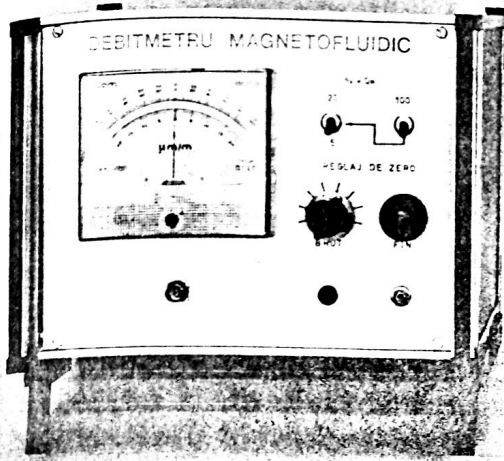


Figura 9.15: Model experimental de debitmetru volumic cu lichid magnetic pentru gaze.

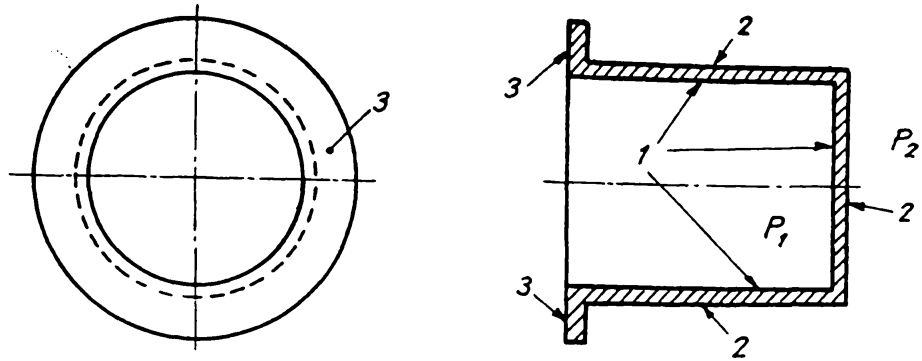


Figura 9.16: Forma aproximativă a piesei de controlat: 1. Suprafață supusă la o presiune a aerului P_1 ; 2. Suprafață supusă la o presiune a aerului P_2 ; 3. Suprafață necontrolată; $P_1 - P_2 = 1atm$.

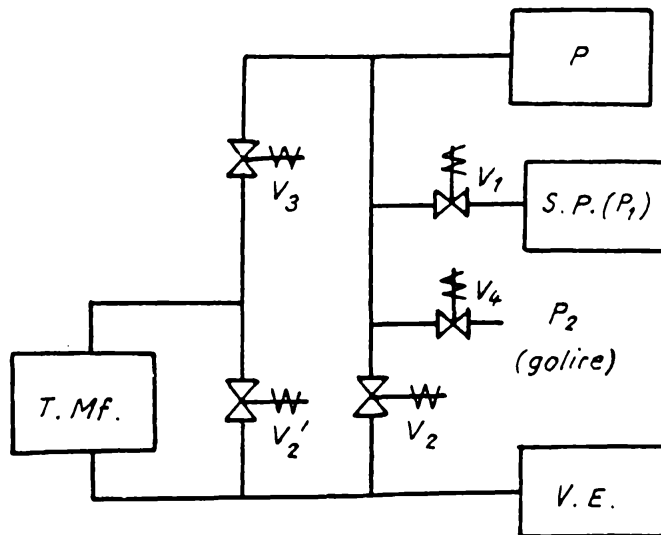


Figura 9.17: Principiul pneumatic de măsură a debitului de aer ce trece prin porii piesei de controlat: P = piesa de controlat; V.E. = volum echivalent; T.Mf. = traductor magnetofluidic; V_n = electroventile; S.P. (P_1) = sursă de aer de presiune P_1 .

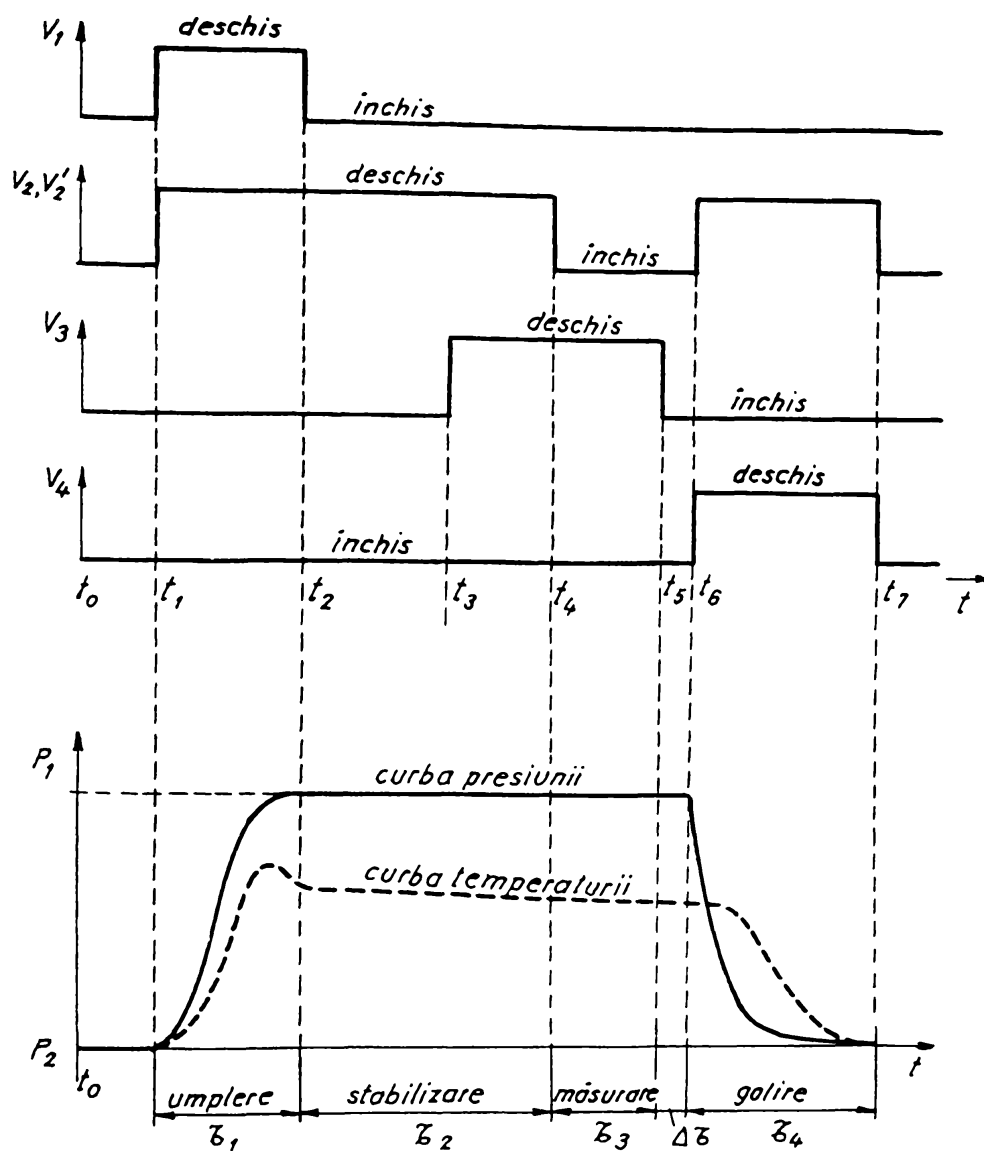


Figura 9.18: Secvența de comandă a electroventilelor și curbele presiunii și temperaturii aerului în piesa de controlat și în piesa de volum echivalent.

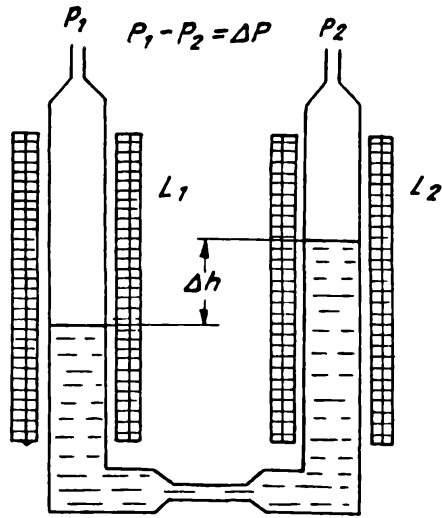


Figura 9.19: Principiul constructiv al traductorului de presiune diferențială pentru gaze.

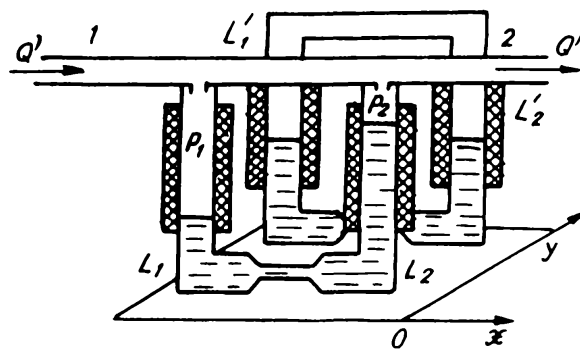


Figura 9.20: Principiul de funcționare al detectorului de debit de scăpări.

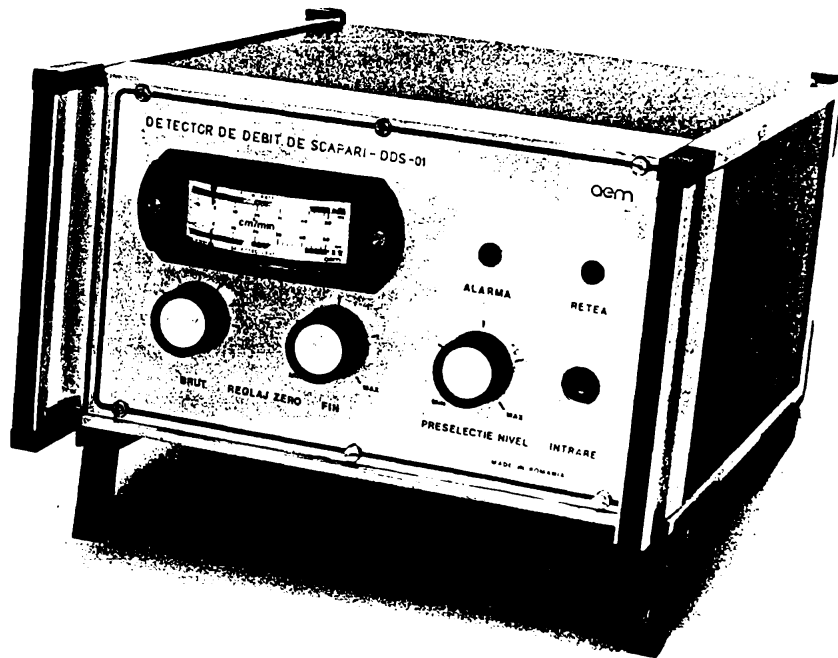
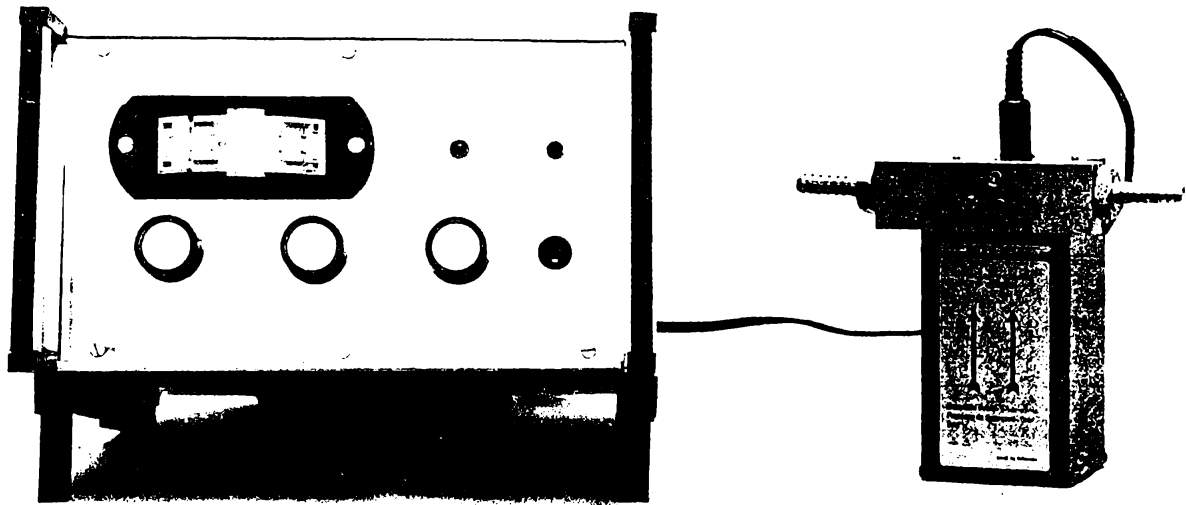


Figura 9.21: Detector de Debit de Scăpări – DDS-01. Aspectul general.

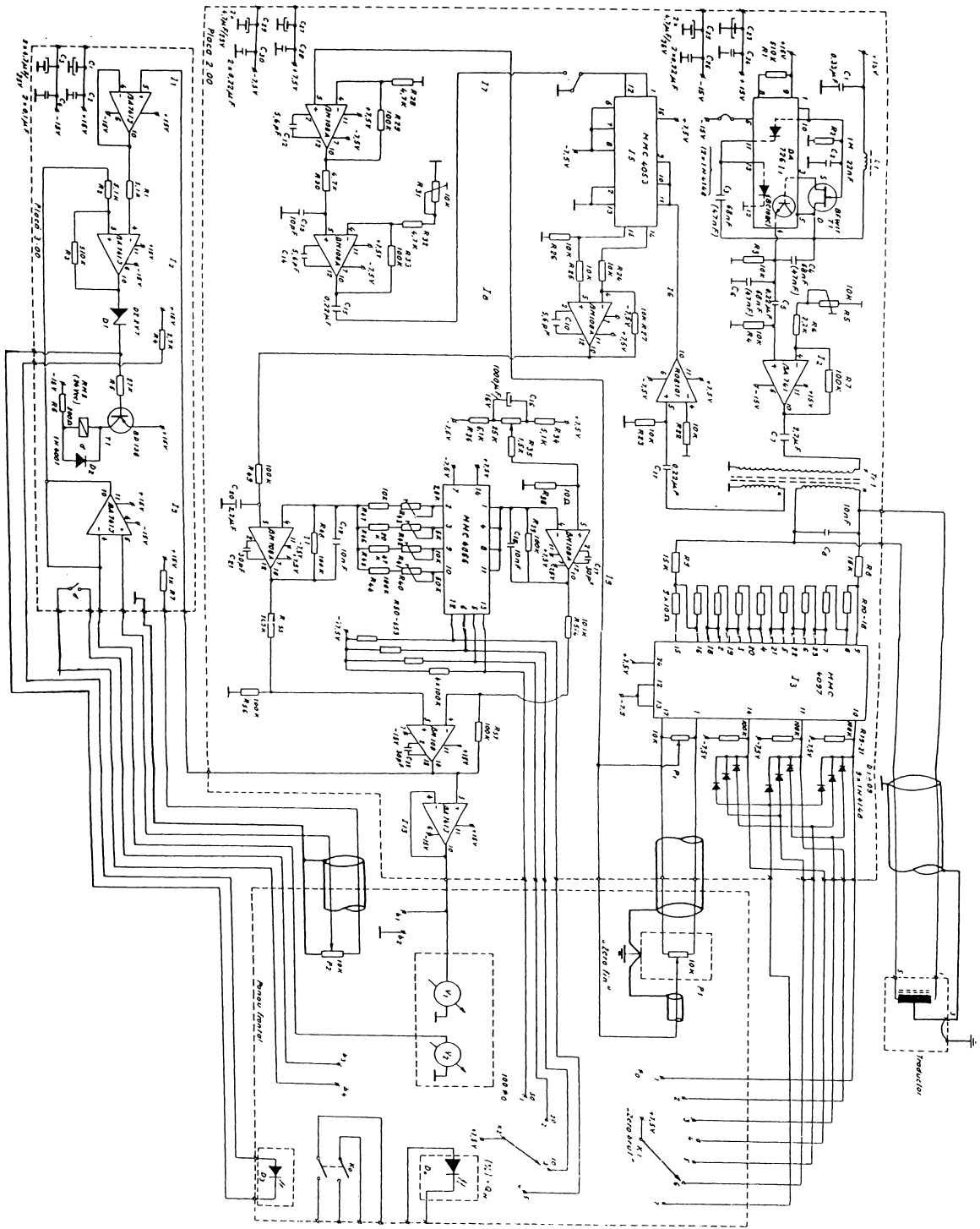


Figura 9.22: Detector de Debit de Scăpări – DDS-01. Schema electrică generală.

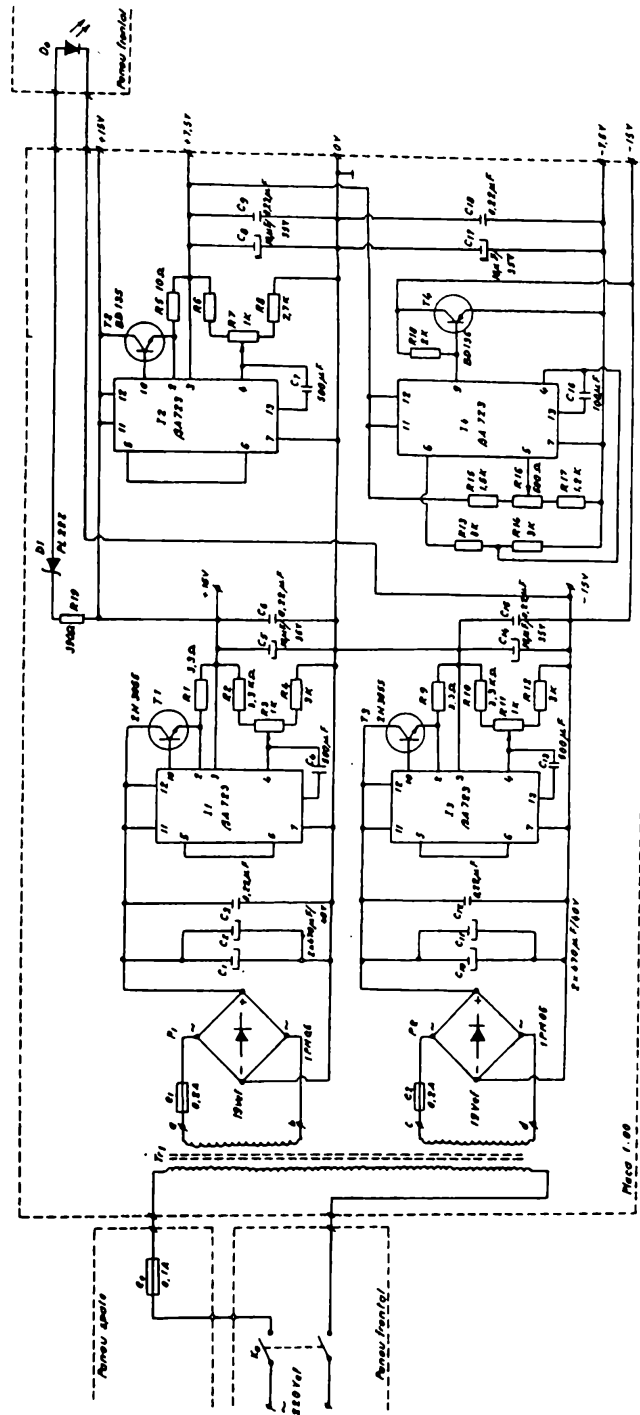


Figura 9.23: Detector de Debit de Scăări – DDS-01. Schema electrică de alimentare.

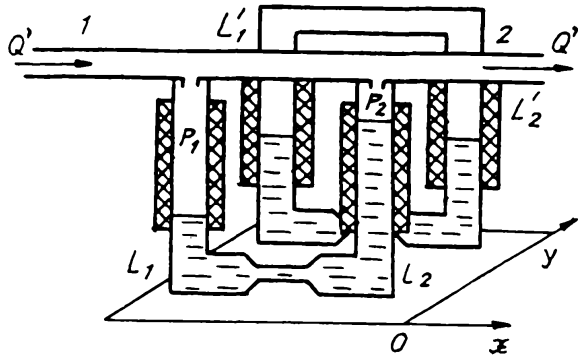


Figura 9.24: Contor de debit volumic pentru gaze. Principiul de funcționare al senzorului.

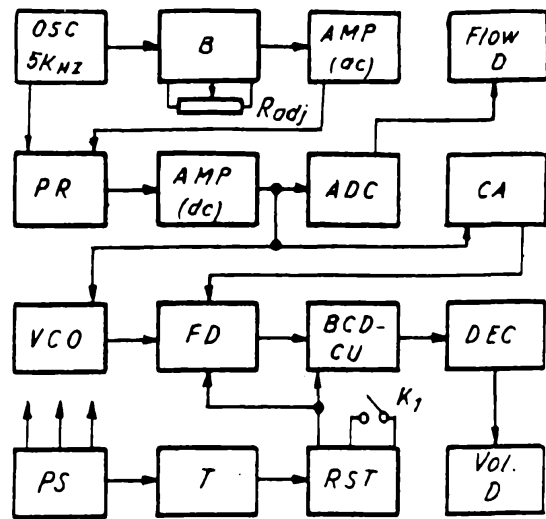


Figura 9.26: Schema bloc minimală de funcționare a contorului. OSC = oscilator; B = punte; PR = redresor în fază; AMP = amplificator; ADC = convertor analog-numeric; Flow D = afișaj debit; Vol. D = afișaj volum; VCO = convertor tensiune-frecvență; FD = divizor de frecvență; CA = autorizare contorizare; BCD-CU = numărător zecimal codificat binar; DEC = decodificator BCD-7 segmente; PS = sursă de alimentare; T = temporizator; RST = reset

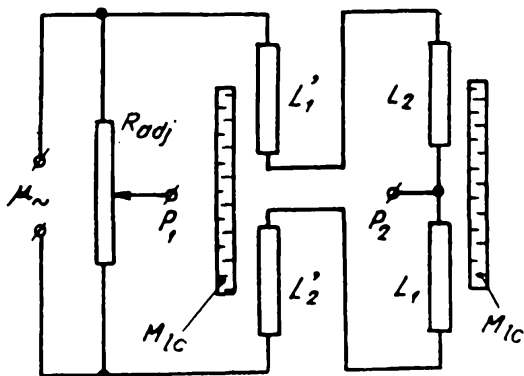


Figura 9.25: Legarea în circuitul electric a bobinelor senzorului. M_{lc} = Coloană de lichid magnetic; R_{adj} = Potențiomtru de reglare a punctului de nul.

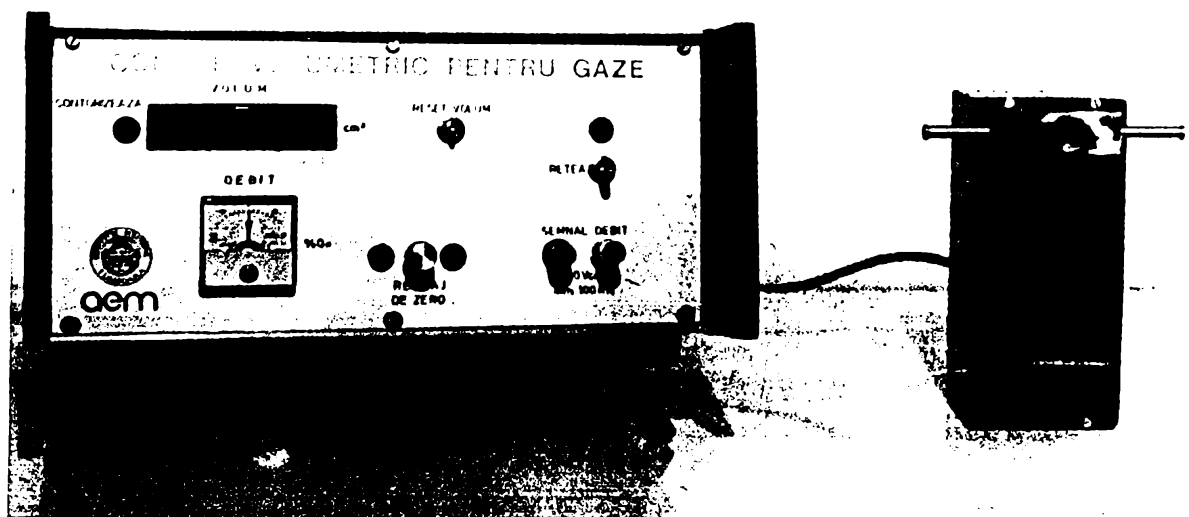


Figura 9.27: Contor de debit volumic pentru gaze. Aspectul de ansamblu.

Figura 9.28: Contor de debit volumic pentru gaze. Schema electrică de măsură.

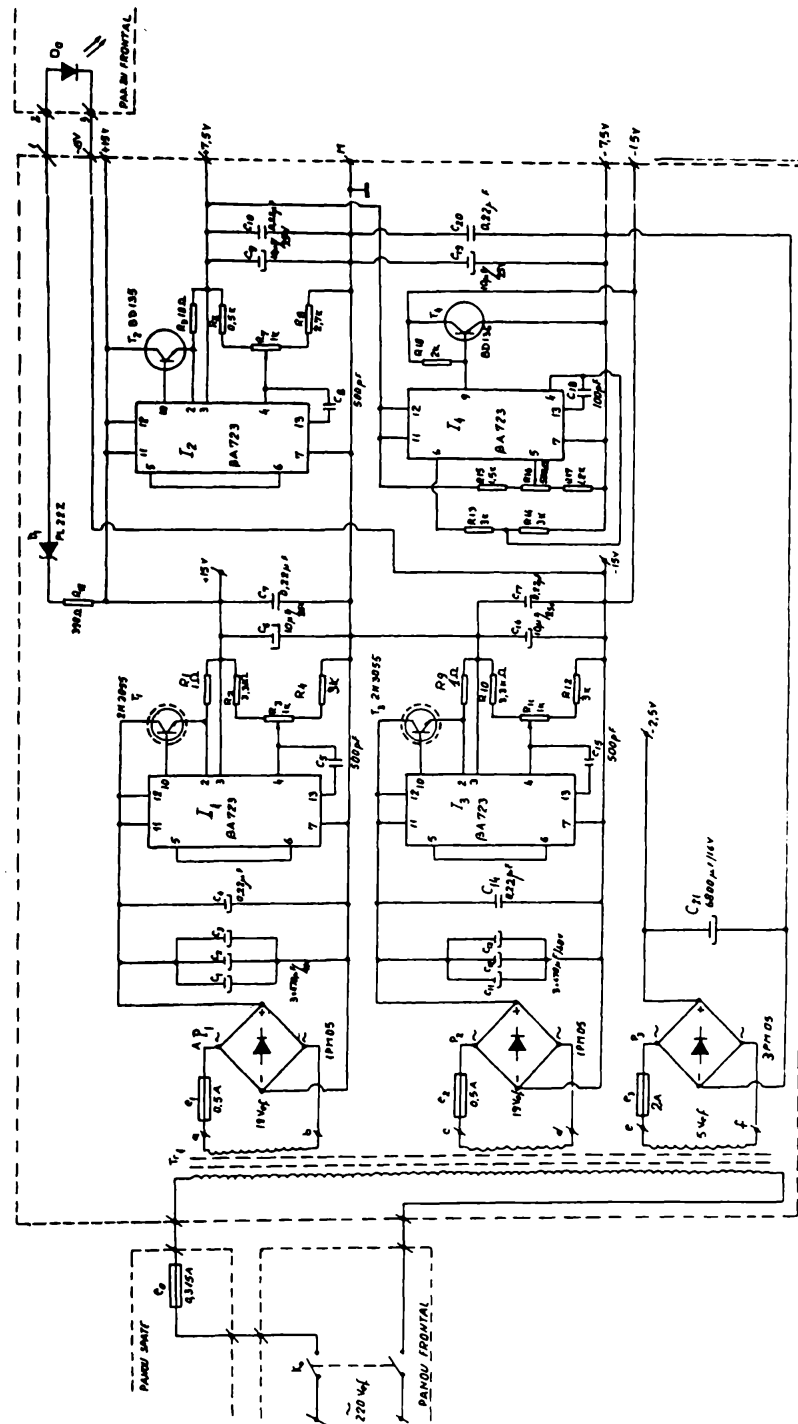


Figura 9.29: Contor de debit volumic pentru gaze. Schema electrică de alimentare.

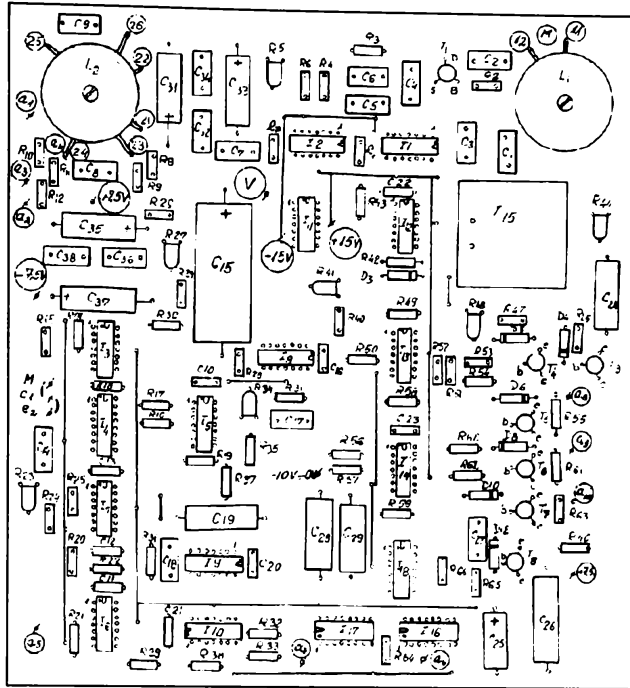


Figura 9.30: Placa de măsură. Fața plantată.

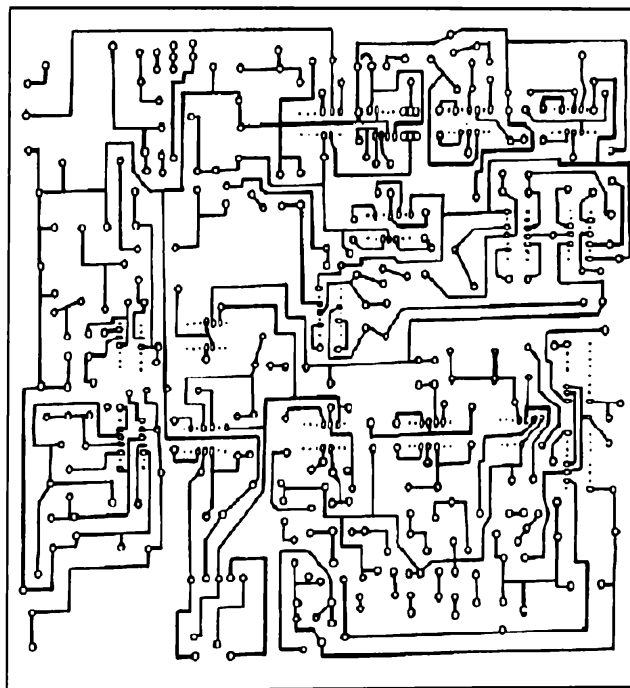


Figura 9.31: Placa de măsură. Fața placată.

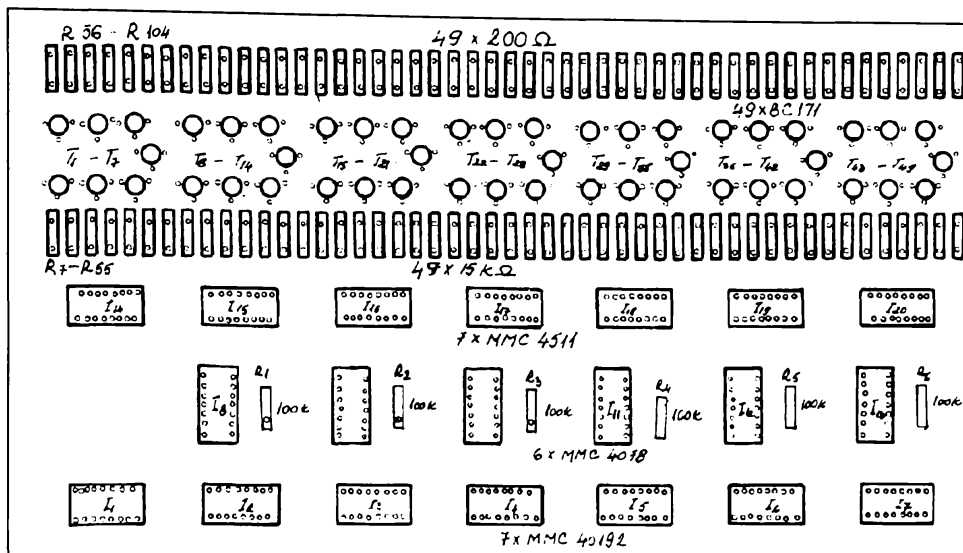


Figura 9.32: Placa contorizare. Fața plantată.

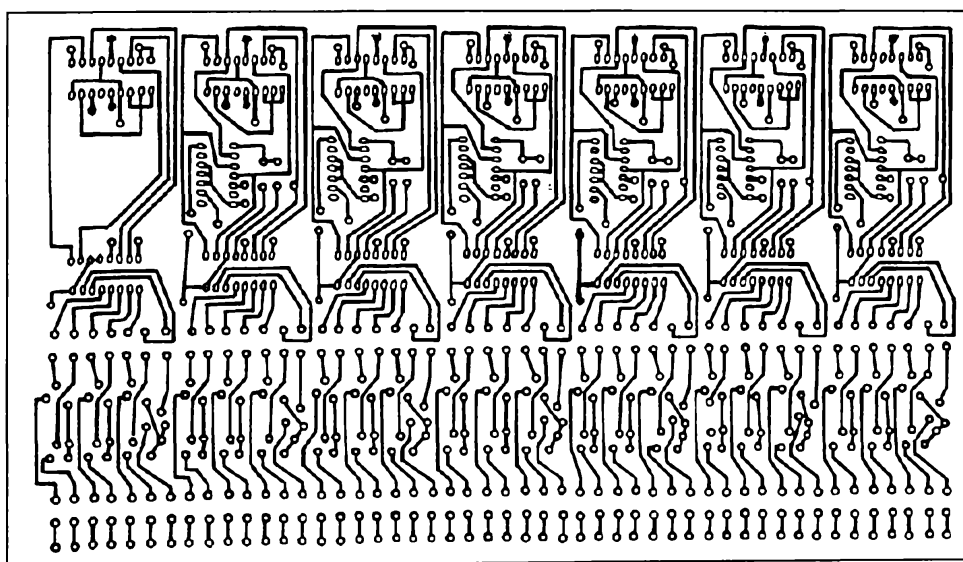


Figura 9.33: Placa contorizare. Fața placată.

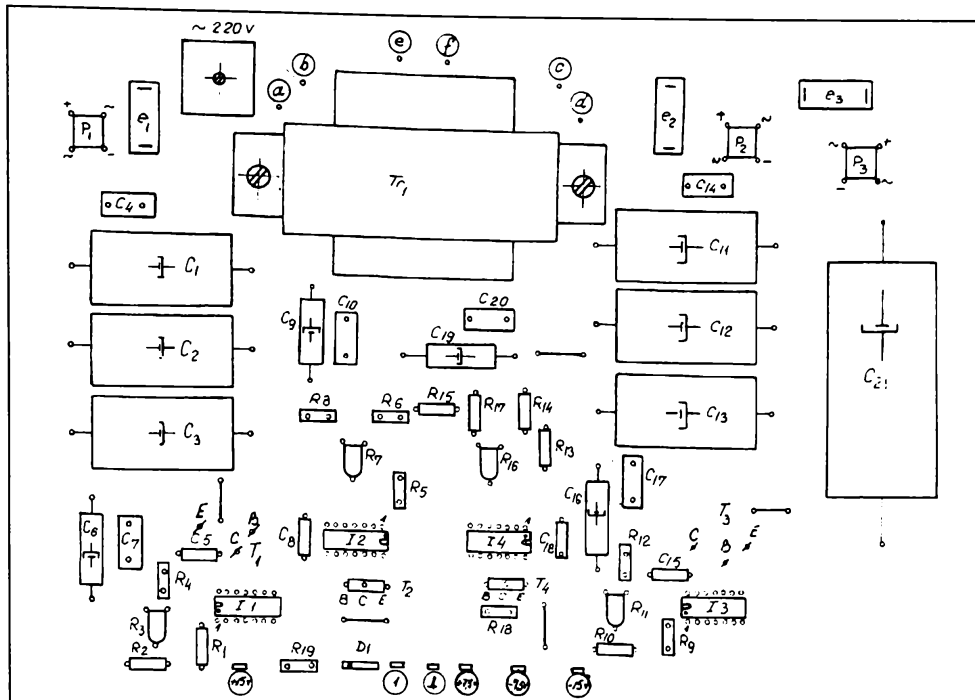


Figura 9.34: Placa de alimentare. Fața plantată.

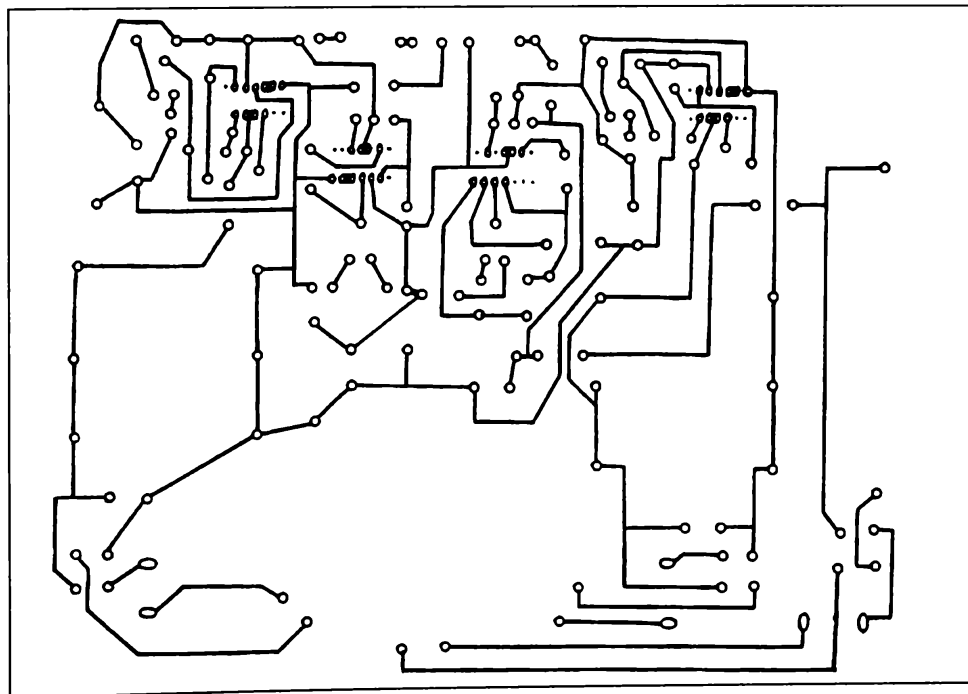


Figura 9.35: Placa de alimentare. Fața placată.

10

Alte tipuri de traductoare inductive cu lichid magnetic realizate de autor

10.1 Debite de gaz foarte mici

Din realizările mai ample în domeniul traductoarelor cu lichid magnetic obținute până la această dată de întreg colectivul C.C.H.C.L.M., în acest capitol sunt prezentate strict proiectele, realizările practice și măsurătorile experimentale efectuate de autor privind alte tipuri de traductoare decât cele studiate și prezentate în capitolele 2 ... 9. Execuția practică a subansamblelor prezentate în figurile 10.2, 10.8, 10.11 și 10.12 s-a făcut în cadrul atelierului mecanic al Catedrei de Mașini Hidraulice din cadru Universității "Politehnica" din Timișoara pe baza proiectelor realizate de autor.

Limita inferioară a debitului măsurat la capăt de scală, pentru traductoarele prezentate anterior este de aproximativ 3 l/h ($50 \text{ cm}^3/\text{min.}$). Plasând partea de oscilator electronic și punte de curent alternativ în interiorul carcasei traductorului precum și măbind tensiunea de alimentare a punții de c.a. de la 1 V ef. la 8 V ef. se estimează posibilitatea coborârii limitei inferioare a debitului măsurat la capăt de scală cu maxim un ordin de mărime ($5 \dots 10 \text{ cm}^3/\text{min.}$). Prin utilizarea unui tub de măsură cu diafragmă și corectarea neliniarității diferenței de presiune funcție de debit printr-un microsistem de calcul se apreciază posibilitatea măsurării unui debit la capăt de scală de aproximativ $1 \text{ cm}^3/\text{min.}$

Sub această limită principiul de măsurare, nu mai dă rezultate corespunzătoare fiind necesară concepția și realizarea unui alt tip de traductor de debit. Principiul de funcționare al acestui nou tip de traductor de debit constă în modificarea inductanței unei bobine cufundată în lichid magnetic, la trecerea unei bule de gaz prin centrul bobinei. Bobina traductorului este legată electric la o punte de măsură și orice variație a inductivității ei produce un semnal electric ce poate fi contorizat. A rezultat deci ca primă problemă proiectarea și realizarea practică a unui traductor inductiv care să lucreze cuplat la instalația din fig. 10.1 și a unei interfețe amplificatoare de impuls.

Condițiile tehnice impuse traductorului și interfeței sunt date de [82] și [100]. Calculul inductanțelor s-a făcut conform [75]. După mai multe încercări, pentru carcasa bobinei traductorului s-a ajuns la desenul din fig. 10.2, iar pentru schema amplificatorului de impuls la desenul din fig. 10.3.

10.1.1 Realizarea unui stand pentru experimentarea traductorului de debit de gaz sub 3 l/h

Deoarece urmărirea cu ochiul liber a fenomenului fizic care se petrece în interiorul lichidului magnetic este imposibilă (lichidul magnetic este opac) pentru verificarea funcționării traductorului s-a recurs la realizarea experimentului din fig. 10.4 care din punct de vedere electric este identic cu situația reală, iar din punct de vedere fizic este "negativul" fenomenului fizic din lichidul magnetic. Respectiv prin interiorul bobinei traductorului s-a picurat lichid magnetic situație care din punct de vedere electric este identică cu cea din fig. 10.5 când prin interiorul bobinei traductorului trec bule de gaz. La trecerea unei picături de lichid magnetic prin bobina traductorului, în difuzor se aude un sunet scurt, iar numărătorul electronic își ridică conținutul cu o unitate. S-a acceptat în primă instanță efectuarea unor experiențe cantitative până la frecvența de 20 Hz și s-a reglat temporizarea monostabilului p_1 astfel încât instalația poate lucra la frecvență maximă de 28 Hz.

Observație: Bobinele A și B ale traductorului sunt legate electric la puntea tensometrică N 2301

10.1.2 Experimentarea modelului de traductor de debit

Traductorul inductiv a fost plasat într-un vas cilindric din sticlă, umplut cu lichid magnetic (fig. 10.5). Prin tubul capilar de formă corespunzătoare se injectează gaz și se produc bule ce trec doar prin bobina superioară, modificând inductivitatea acesteia față de bobina inferioară. Vasul a fost închis cu un dop de cauciuc prevăzut cu o priză de racord. Între această priză și tubul capilar s-a realizat o diferență de presiune fin reglabilă, Δ_p , obținută de la prizele de presiune ale tunelului de etalonare DISA, diferență de presiune necesară producerii bulelor.

Vasul cilindric cu lichidul magnetic, traductor și sursă de bule a fost așezat între polii hiperbolici sau paraleli ai unui electromagnet. S-a stabilit o anumită diferență de presiune Δ_p , la care corespunde frecvența de emisie "f" a bulelor de gaz. Apoi s-a ridicat treptat tensiunea aplicată bobinelor electromagnetului crescând astfel valoarea inducției magnetice în lichidul magnetic până când s-a anulat emisia de bule ($f=0$). Acest experiment demonstrează faptul că, ponderea presiunii magnetice apărute în momentul aplicării câmpului magnetic exterior, este mult mai mare decât ponderea tensiunii superficiale și a forței de levitație ce acționau până în acel moment asupra bulei. De altfel, deși fenomenul nu a fost vizualizat, efectul presiunii magnetice este prezent și prin deformarea bulei (micșorarea volumului ei și în consecință micșorarea forței ascensionale).

Variația frecvenței de emisie a bulelor în funcție de valoarea inducției magnetice este reprezentată în fig. 10.6 în cazul polilor hiperbolici (câmp neuniform cu gradient constant) și în fig. 10.7 pentru polii plan paraleli (câmp uniform) ([101]). În ambele cazuri se constată o variație pronunțată a frecvenței de emisie a bulelor cu intensitatea câmpului magnetic exterior.

Fenomenul observat oferă posibilitatea construirii unui microdebitmetru de gaz cu semnal electric la ieșire și cu posibilitatea reglării debitului pe cale electromagnetică.

În domeniul bulelor de volum constant, debitul e proporțional cu frecvența de emisie a bulelor și este ușor reglabil pe cale electromagnetică. În funcție de diametrul tubului capilar pot fi realizate dispozitive de acest tip în domeniul de debite de la 0 până la câțiva

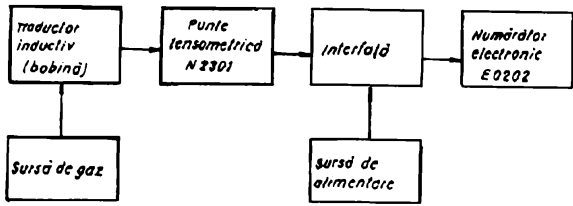


Figura 10.1: Schema bloc generală a instalației

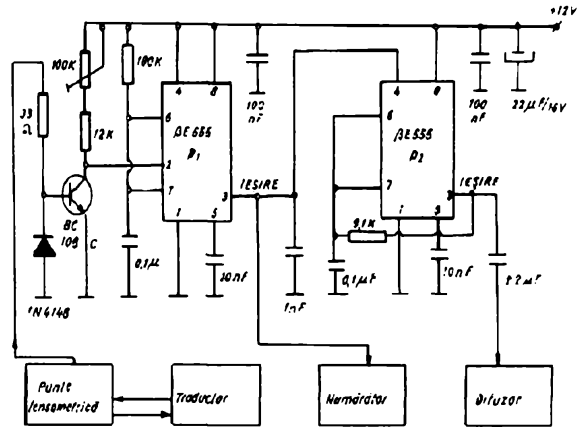


Figura 10.3: Interfață cu circuit basculant monostabil și oscilator sonor

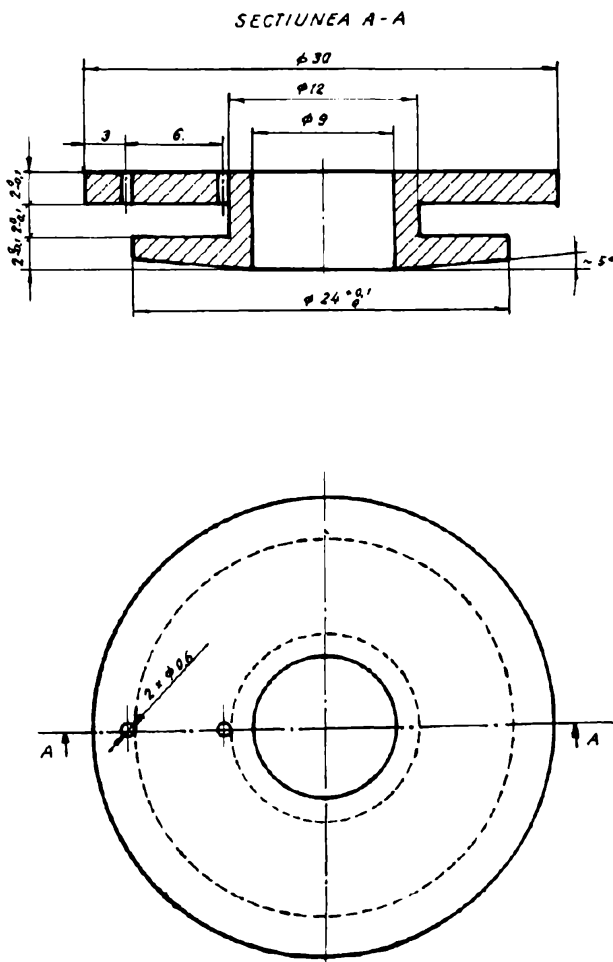


Figura 10.2: Carcasă bobină traductor

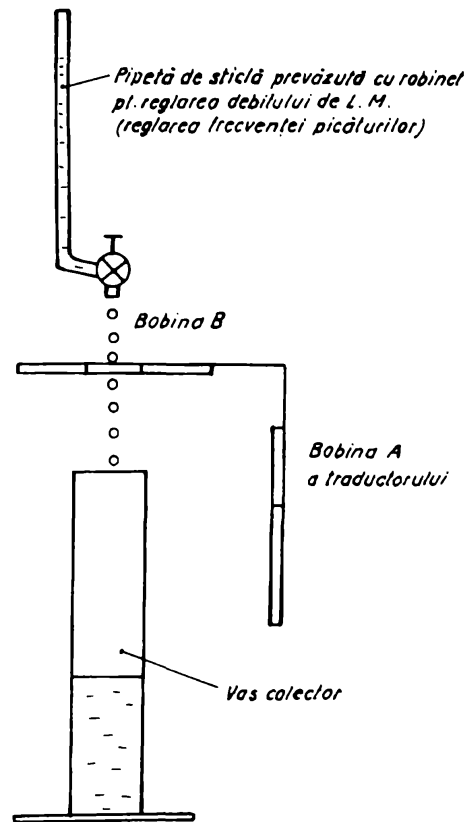


Figura 10.4: Montaj experimental utilizat la încercarea traductorului cu picături de lichid magnetic

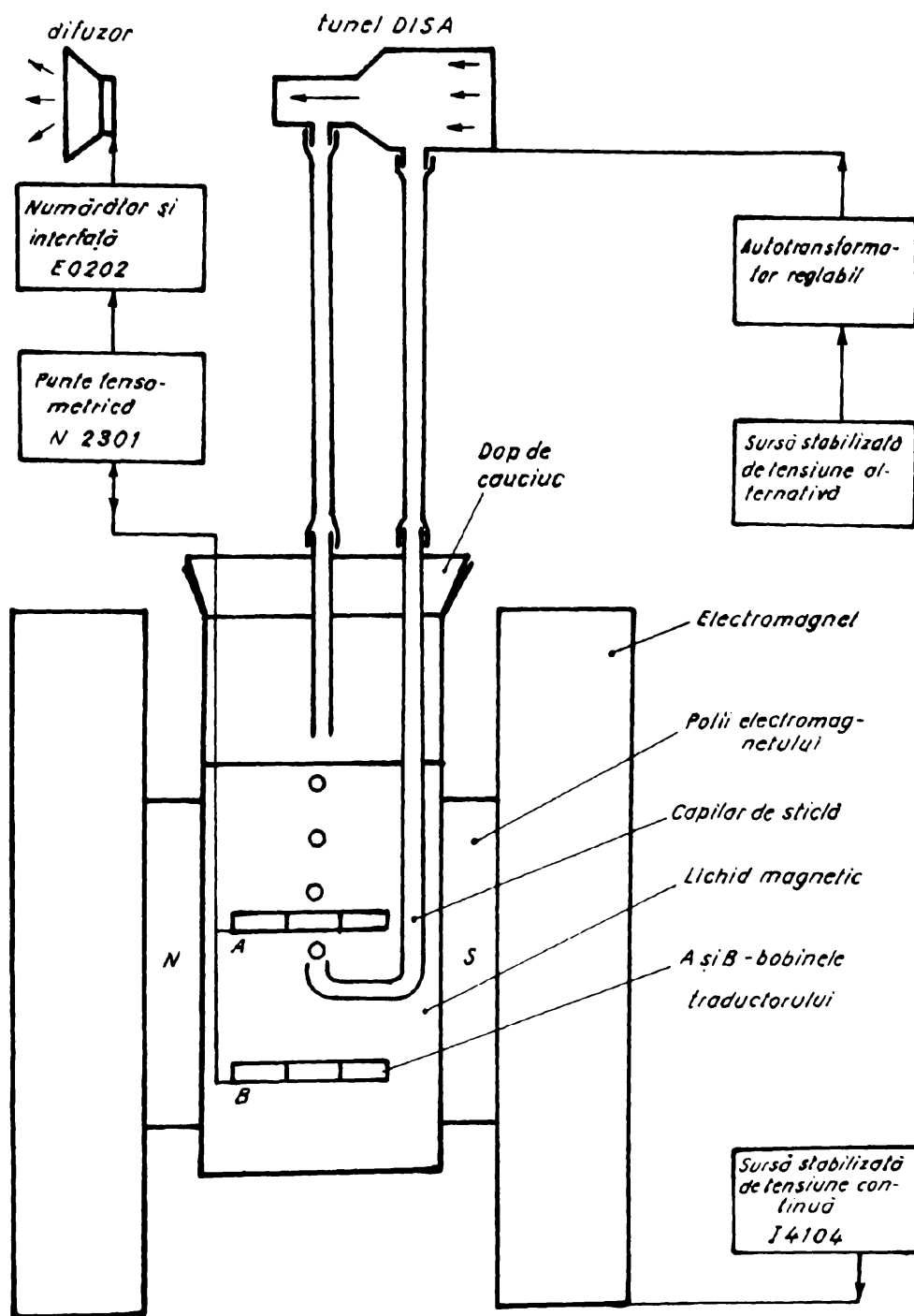


Figura 10.5: Stand pentru experimentarea traductorului de debit

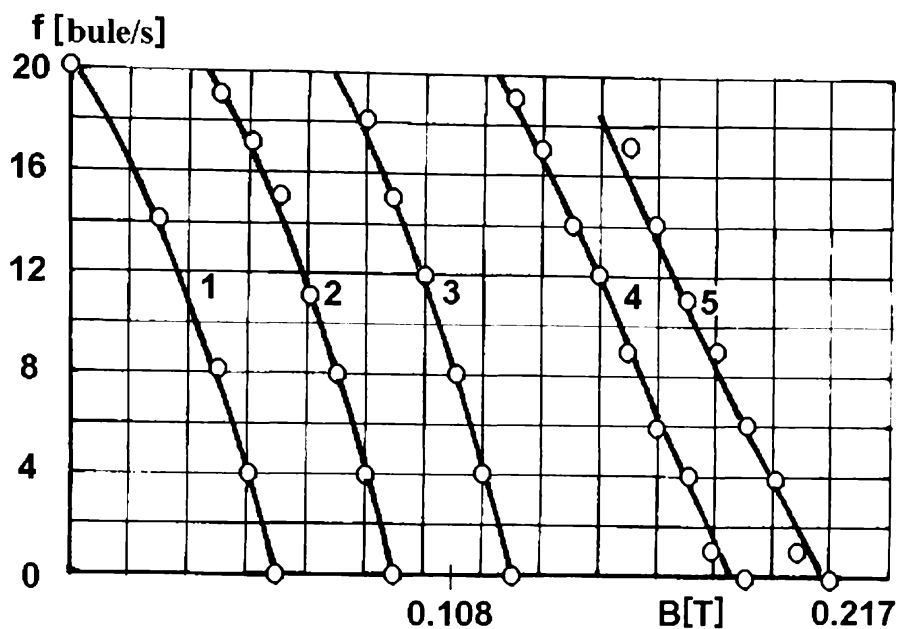


Figura 10.6: Variația frecvenței de emisie a bulelor de gaz în funcție de valoarea inducției câmpului magnetic B (poli paraleli plani, câmp uniform). **1** $\Delta P=84\text{mm } H_2O$, **2** $\Delta P=96\text{mm } H_2O$, **3** $\Delta P=108\text{mm } H_2O$, **4** $\Delta P=136\text{mm } H_2O$, **5** $\Delta P=144\text{mm } H_2O$.

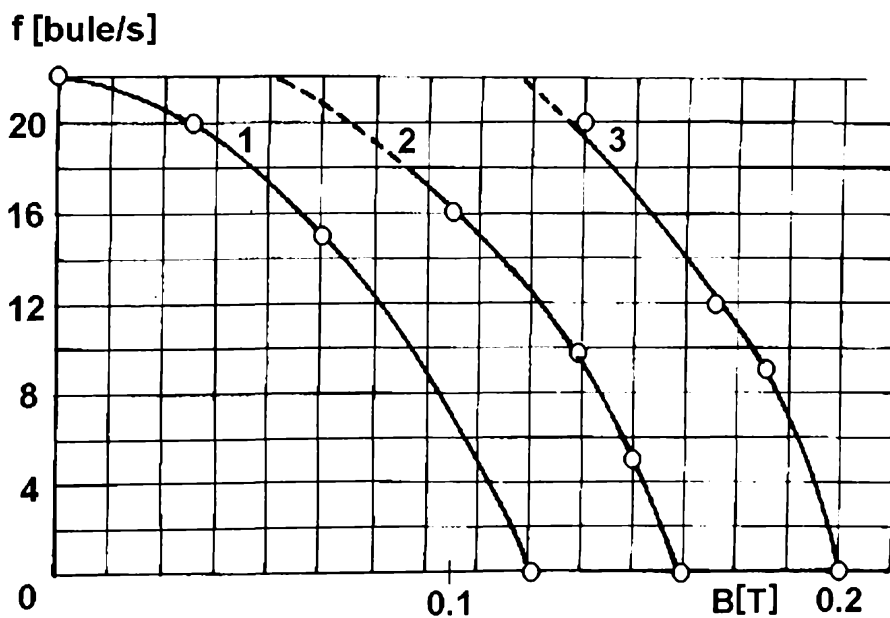


Figura 10.7: Variația frecvenței de emisie a bulelor de gaz în funcție de valoarea inducției câmpului magnetic B (poli hiperbolici, câmp cu gradient constant). **1** $\Delta P=104\text{mm } H_2O$, $G=1.18 \text{ T/m}$, **2** $\Delta P=116\text{mm } H_2O$, $G=1.69 \text{ T/m}$, **3** $\Delta P=132\text{mm } H_2O$, $G=2.0 \text{ T/m}$.

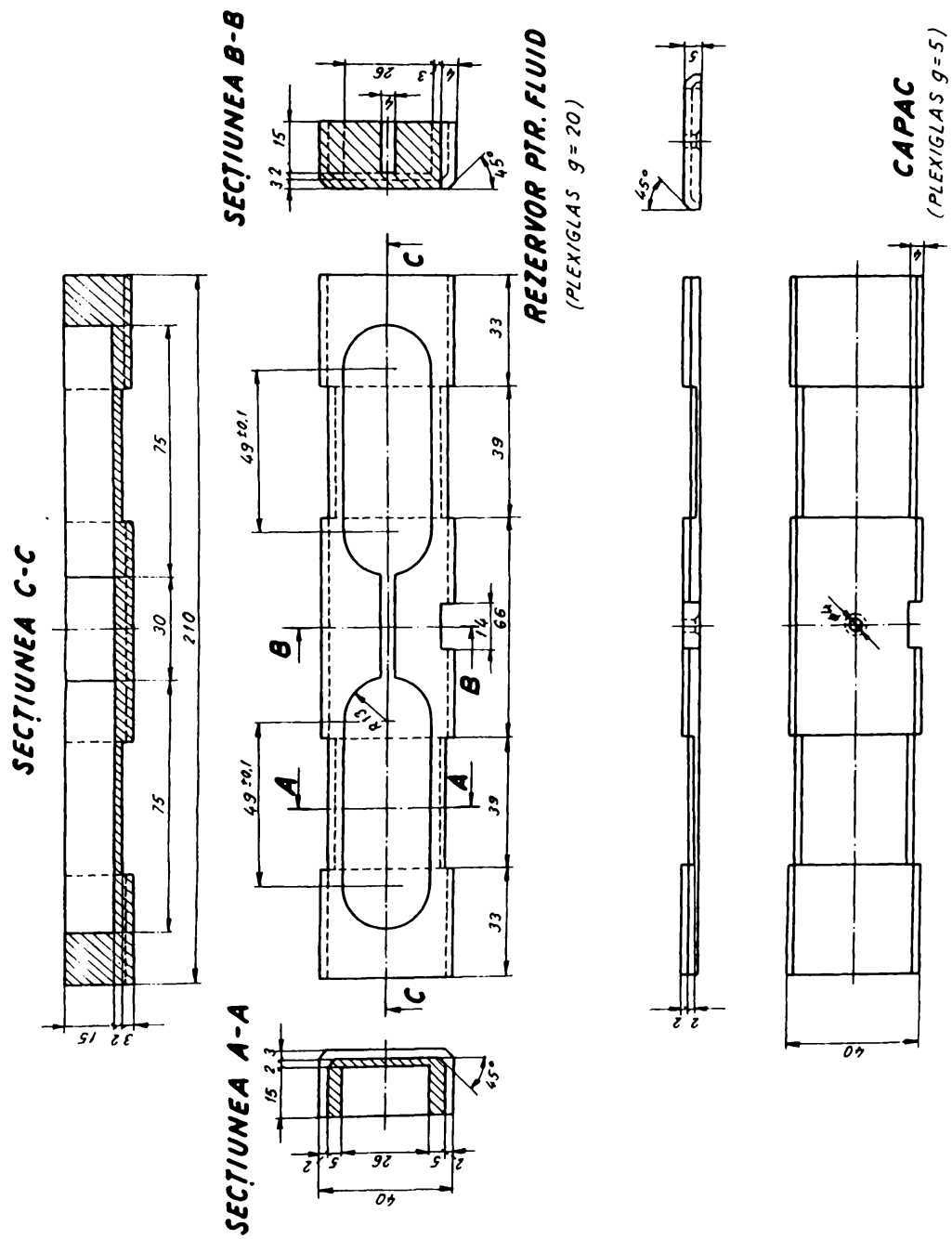


Figura 10.8: Traductor cu rezervor orizontal și în exteriorul bobinei. Subansamble.

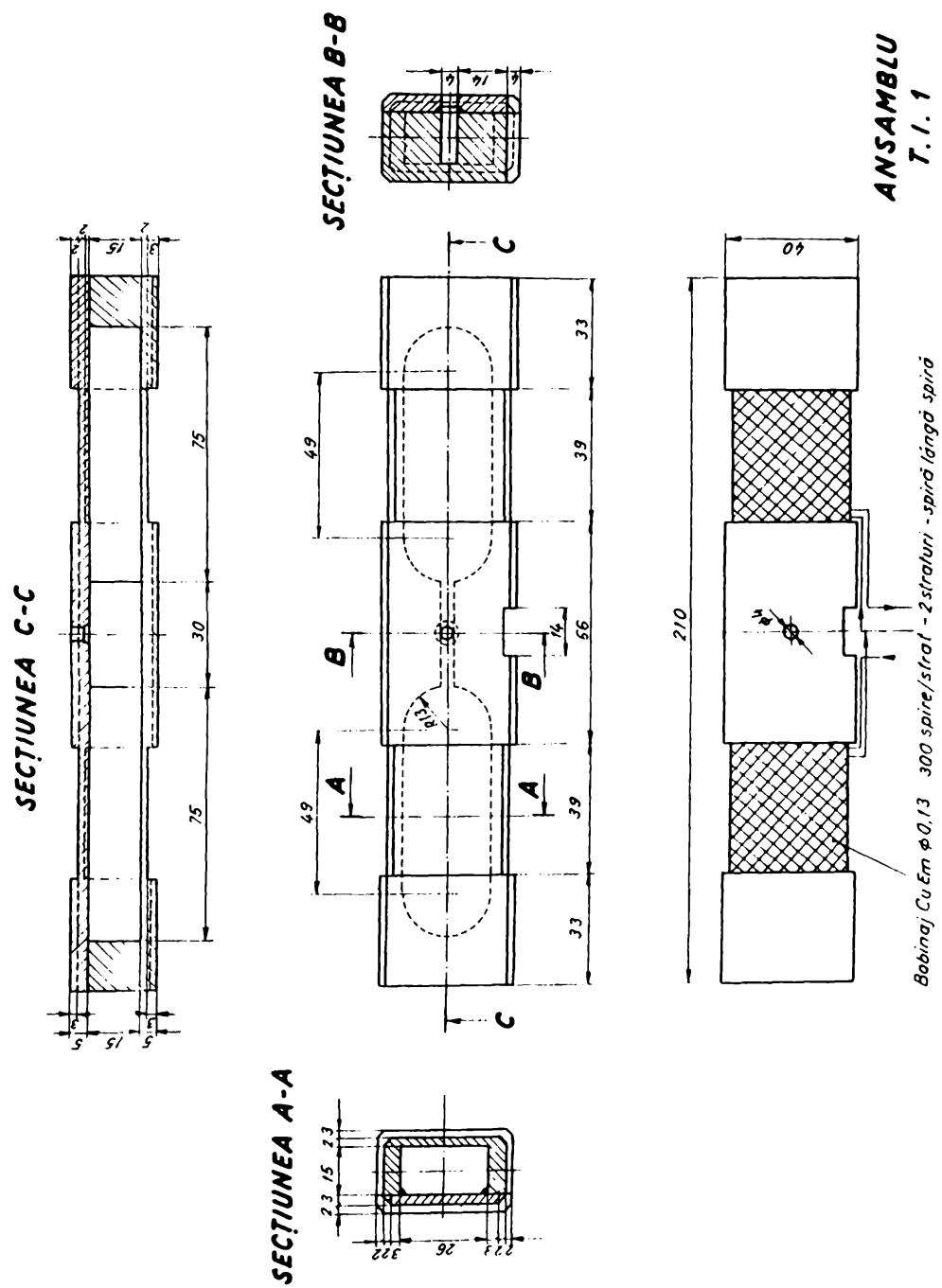


Figura 10.9: Traductor cu rezervor orizontal și în exteriorul bobinei. Vedere de ansamblu.

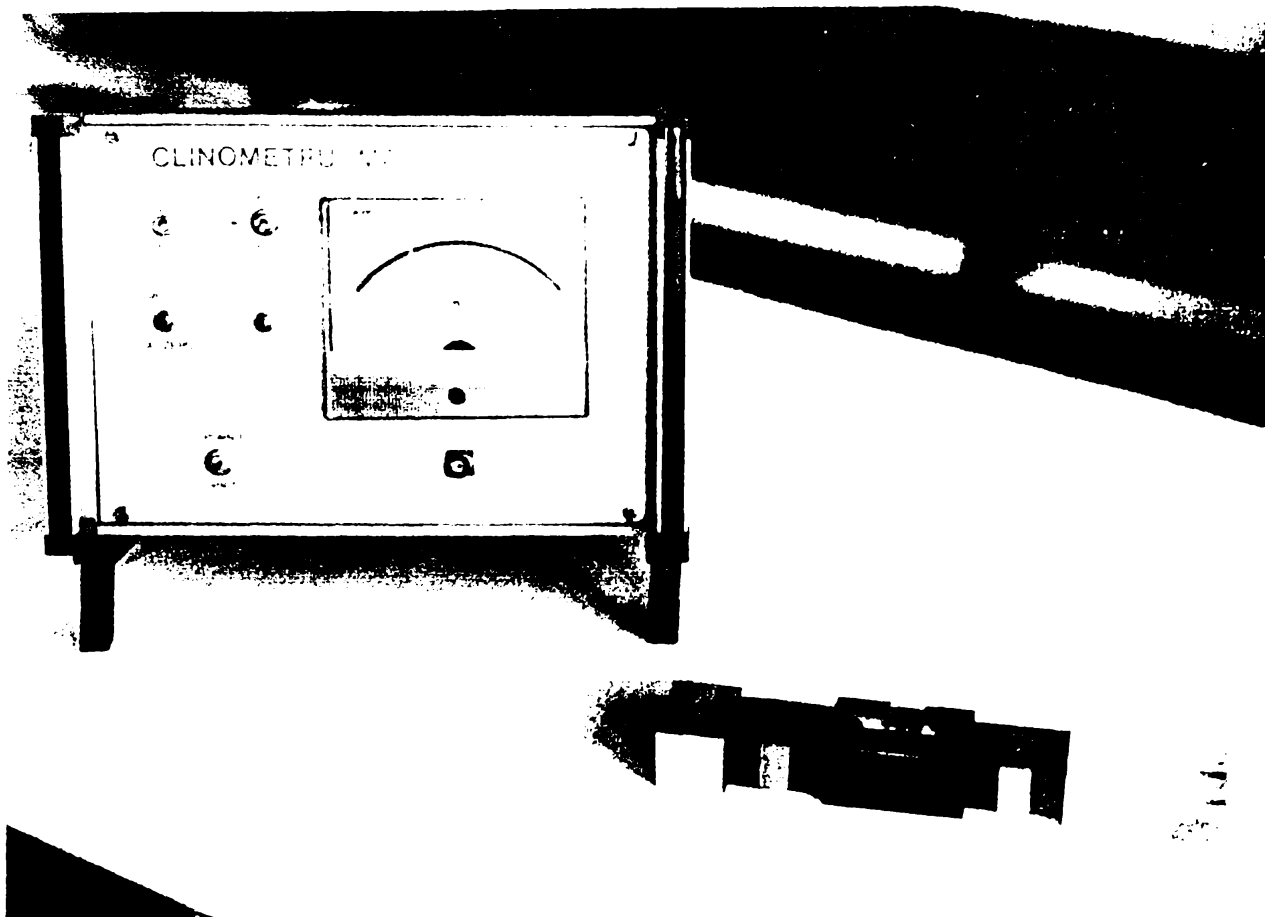


Figura 10.10: Traductor cu rezervor orizontal și în exteriorul bobinei. Vedere generală.

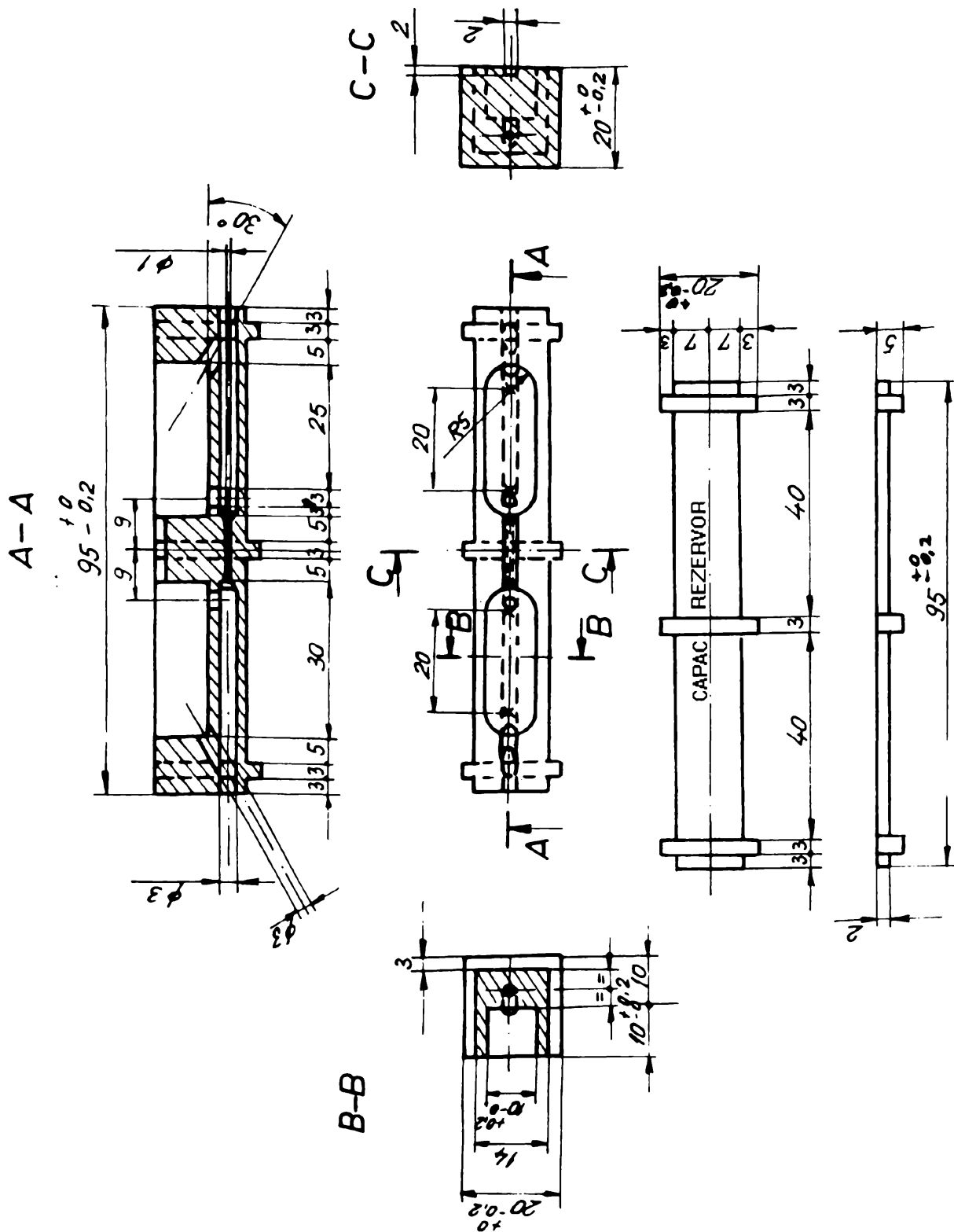


Figura 10.11: Traductor cu rezervor orizontal strict în interiorul bobinei. Subansamblu.

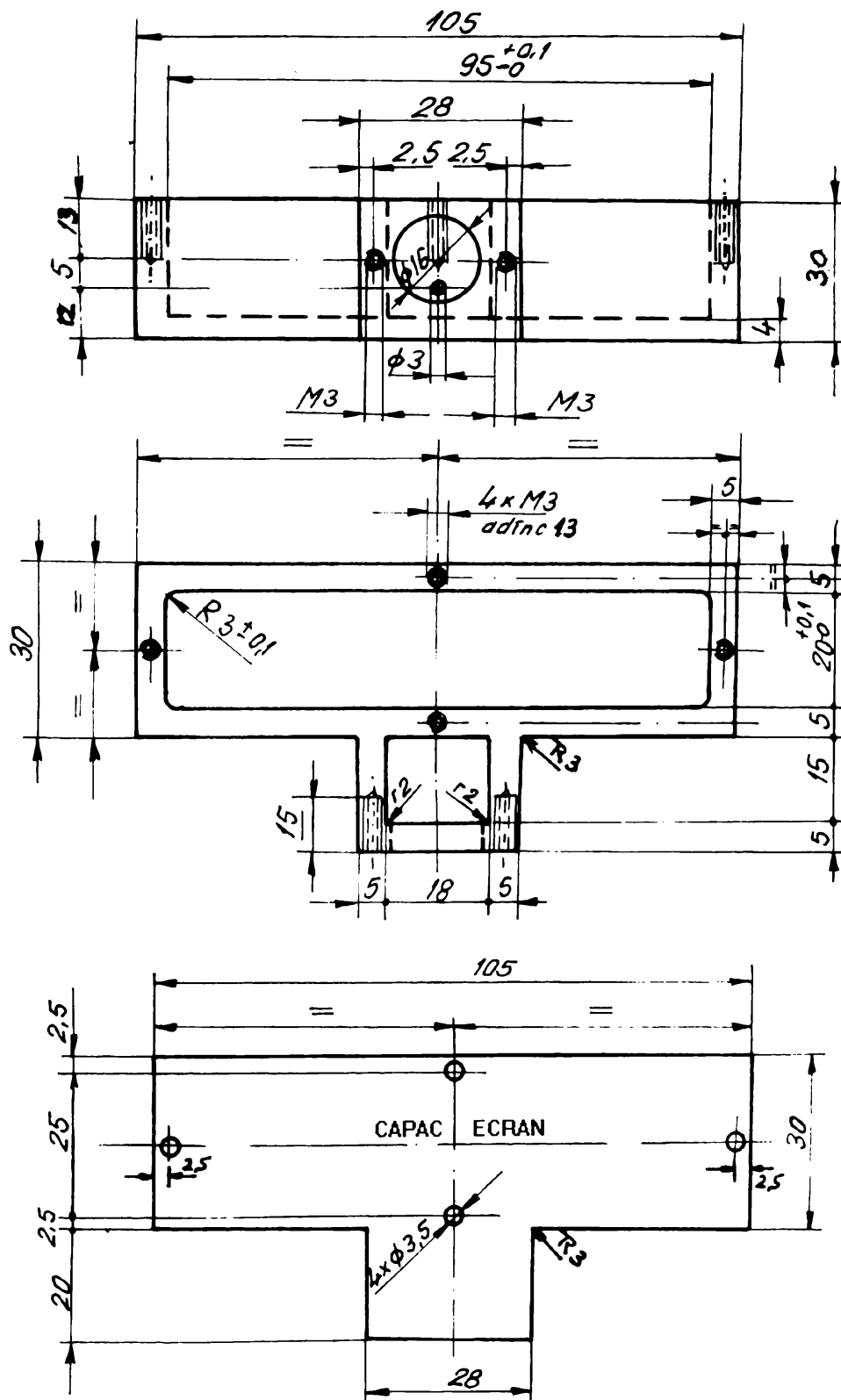


Figura 10.12: Traductor cu rezervor orizontal strict în interiorul bobinei. Ecran.

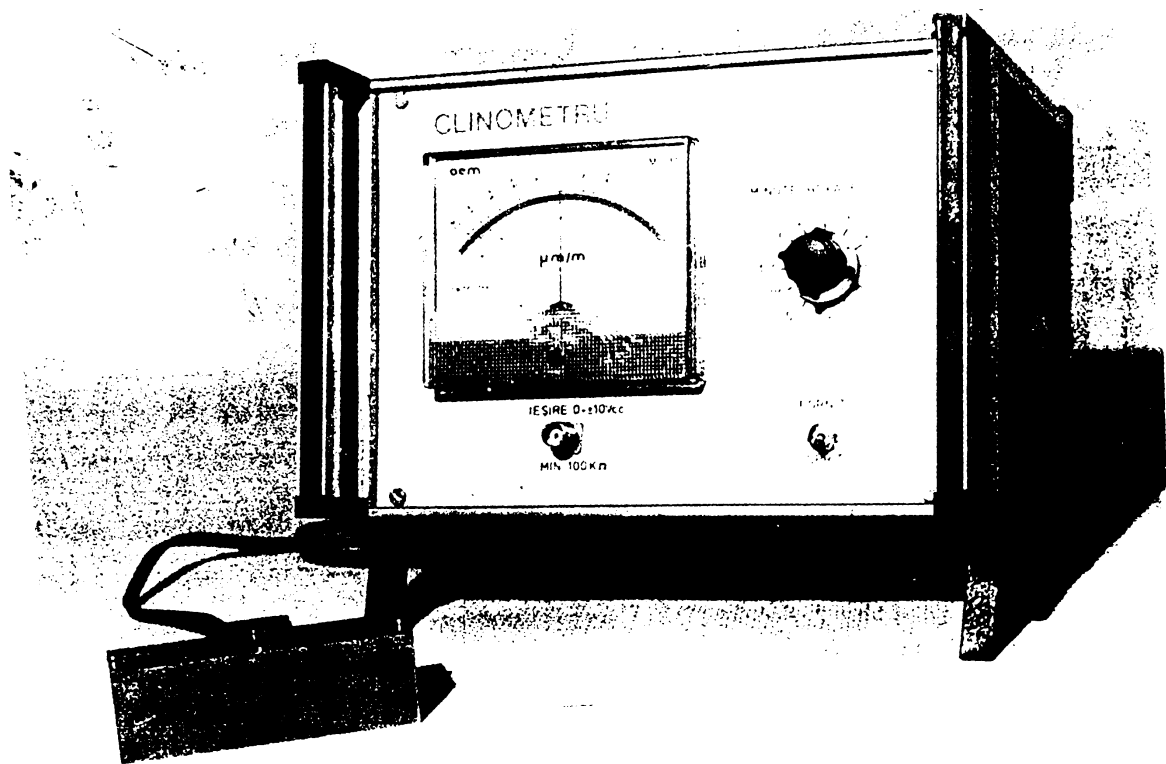


Figura 10.13: Traductor cu rezervor orizontal strict în interiorul bobinei. Vedere generală.

cm³/min.

În literatura de specialitate există prezetate încercări de a construi aparate bazate pe principiul măsurării frecvenței bulelor ce trec prin lichid magnetic [102]. În acel caz s-a folosit un alt principiu de detectare a bulelor de gaz și s-a lucrat până la o frecvență maximă a bulelor de 10 Hz, fără a se încerca reglarea pe cale electromagnetice.

10.2 Traductorul cu rezervor orizontal

O altă familie de traductoare inductive cu lichid magnetic pentru mărimi aerodinamice și înclinare se poate construi utilizând traductoare cu rezervoare orizontale ([36, 37]) sau pseudo-orizontale ([27, 103]). Principalul avantaj al traductoarelor cu rezervoare orizontale este posibilitatea obținerii unor traductoare cu sensibilitate mărită. Acest avantaj se obține în detrimentul altor parametri ai traductorului cum ar fi: liniaritatea, timpul de răspuns, stabilitatea termică a punctului de nul ca urmare a modificării nivelului lichidului magnetic, etc..

În ce privește traductoarele cu rezervor pseudo-orizontal, câștigul în sensibilitate față de cele cu rezervoare verticale, nu mai este așa de mare și apare problema execuției mecanice la toleranțele precizate.

Indiferent de tipul de traductor folosit, partea electronică de măsură prezentată în capitolele anterioare rămâne aceeași.

10.2.1 Traductorul cu rezervor și în exteriorul bobinei

În figurile 10.8 ... 10.10 este prezentat un traductor de înclinare cu rezervor orizontal și în exteriorul bobinei. Traductorul echivalent pentru diferență de presiune se obține aplicând prize de presiune celui de înclinare și cuplându-l mecanic cu un altul de înclinare. Spre deosebire de traductoarele de diferență de presiune cu rezervor vertical, la cele cu rezervor orizontal corecția de înclinare este necesară în toate situațiile.

Principalul dezavantaj al traductorului cu rezervor orizontal și în exteriorul bobinei este sensibilitatea traductorului la "valurile" de lichid magnetic produse în interiorul fiecărui rezervor. Prezența acestor valuri (a căror influență nu poate fi eliminată de corecția la înclinare), duce la mărirea exagerată a timpului de răspuns al traductorului.

Traductorul cu rezervor orizontal și în exteriorul bobinei este cel mai sensibil construit până în prezent de autor. Experimentarea și etalonarea acestui traductor este posibilă numai așezat pe o masă seismică mare care să nu preia vibrațiile solului.

10.2.2 Traductorul cu rezervor strict în interiorul bobinei

Influența valurilor poate fi atenuată (în detrimentul sensibilității) folosind un traductor cu rezervor orizontal plasat strict în interiorul bobinei (fig 10.11 ... 10.13). Se observă că și în cazul acestui traductor (ca și în cazul celui prezentat anterior), pereții verticali ai rezervoarelor sunt plani. Acest lucru duce la diminuarea modificării punctului de nul odată cu variația termică de nivel a lichidului magnetic.

În toate lucrările de specialitate întâlnite de autor până în prezent, în care se folosesc rezervoare orizontale, acestea au secțiune verticală circulară, situație extrem de defavorizantă pentru stabilitatea termică a punctului de nul și pentru lărgirea plajei de măsură la o liniaritate impusă.

11

Concluzii

11.1 Concluzii generale

- Din bibliografia citată se observă clar interesul manifestat în ultimul timp de comunitatea științifică internațională privind domeniul lichidelor magnetice și aplicațiilor lor. Alături de unele aplicații devenite tradiționale, o atenție deosebită este acordată și traductoarelor și senzorilor realizați pe baza proprietăților lichidelor magnetice. Această atenție îndreptată asupra traductoarelor și senzorilor cu lichid magnetic este sprijinită de un interes mai larg pe care societatea îl acordă tuturor tipurilor de traductoare și senzori (Conferința Internațională (anuală) *EUROSENSORS* ajunsă în 1996 la ediția a X-a, 1st European Magnetic Sensors and Actuators Conference *EMSA '96*, etc).
- Lucrarea prezintă deducerea câtorva relații analitice ((2.14), (2.15), (3.80), (4.47) și (4.56)) cu ajutorul cărora se pot obține extrem de rapid informații privind funcționarea electrică a acestor tipuri de traductoare și implicit estimări privind unele caracteristici tehnice și modalitățile de îmbunătățire a lor. Dezavantajul tuturor relațiilor analitice constă în faptul că nu pot cuprinde toți parametrii necesari a fi luați în considerare pentru proiectarea riguroasă a traductoarelor de mare precizie.
- Deși mai lentă decât calculul analitic, metodologia de calcul numeric prezentată în capitolele 5 și 6 are avantajul de a putea preciza toți parametrii tehnici (toate dimensiunile) ce apar în construcția traductorului, precum și toleranțele acestor parametrii.
- Rezultatele măsurătorilor experimentale efectuate pe modelele prezentate în capitolele 9 și 10 (precizii de ordinul 2% . . . 5% dar și precizii mai bune decât 1% pentru traductorul diferențial de presiune) demonstrează posibilitatea realizării acestor tipuri de traductoare în domeniul de valori și la precizia cerută. Considerațiile expuse în subcapitolul 9.6 privind modularizarea traductoarelor arată ușurința cu care acestea se pot adapta la producția de serie mare.
- Ca urmare a activității de cercetare desfășurate la Centrul de Cercetări de Hidrodinamică Cavitație și Lichide Magnetice în baza contractului cu AEM-S.A. Timișoara, [25] este primul catalog de produse de acest tip.

11.2 Contribuții personale

1. Lucrarea abordează un domeniu nou și anume cel al utilizării lichidelor magnetice în construcția unor traductoare și senzori pentru mărimi aerodinamice și înclinare precum și problemele legate de dimensionarea electrică și mecanică a acestor tipuri de traductoare.
2. După o succintă prezentare a domeniului mai larg de cercetare a producerii, proprietăților și aplicării lichidelor magnetice, s-a precizat încadrarea traductoarelor cu lichid magnetic prezentate în lucrare, într-o clasificare generală a traductoarelor acceptată la această dată.
3. Pornind de la expresia cunoscută a inductanței mutuale a două spire circulare aflate în plane paralele și situate într-un mediu liniar, omogen, izotrop și fără magnetizație permanentă (centrele spirelor fiind considerate pe o aceeași dreaptă perpendiculară pe planele spirelor), pe baza metodei imaginilor s-a dedus o expresie originală privind inductivitatea unei spire circulare reale plasată în mediu eterogen ((3.16)).
4. Considerând bobina reală ca o sumă finită de spire reale și acceptând modelul teoretic al unei bobine cu spire reale cufundată parțial în lichid magnetic, s-a prezentat deducerea unei relații analitice originale care exprimă inductivitatea unei bobine reale funcție de nivelul lichidului magnetic (relația (3.80)).
5. Pe baza teoremei Biot-Savart, utilizând metoda imaginilor s-au dedus expresiile vectorului inducție magnetică pentru un element de circuit plasat în mediu eterogen ((4.12) ... (4.15)).
6. Acceptând modelul teoretic de bobină filiformă s-a prezentat deducerea unei relații analitice originale care exprimă inductivitatea unei bobine filiforme funcție de nivelul lichidului magnetic ((4.47)). Deși această relație ia în considerare fluxul vectorului inducție magnetică pe întreaga suprafață a spirelor bobinei, inclusiv valoarea sa infinită din vecinătatea spirei, totuși inductanța obținută pentru bobină este finită.
7. Pentru calculul inductanței unei bobine reale, cu sau fără ecran, cu lichid magnetic strict în interiorul bobinei, s-a elaborat un program original de simulare a câmpului magnetic, folosind metoda diferențelor finite.
8. S-au elaborat programe originale de reprezentare grafică pentru vizualizarea în diverse secțiuni a câmpului magnetic și pentru vizualizarea rezultatelor experimentale comparativ cu cele teoretice.
9. Pe baza unui principiu original s-a realizat o instalație experimentală și s-au făcut verificări experimentale asupra variației de inductanță a bobinelor la excursia lichidului magnetic pentru două bobine diferite și patru lichide magnetice diferite. Compararea acestor măsurători experimentale cu rezultatele calculate numeric a permis stabilirea unui factor de corecție pentru susceptivitatea magnetică inițială a lichidului magnetic măsurată cu metodele cunoscute.
10. Cu ajutorul formulelor analitice deduse și a programului de simulare numerică s-a analizat liniaritatea variației de inductanță a bobinei la excursia lichidului magnetic și liniaritatea traductoarelor diferențiale construite cu bobine de acest tip.

11. Pentru traductoarele diferențiale s-a proiectat un amplificator de măsură original, cu reglaj al punctului de zero dintr-un singur potențiomtru. S-au dedus ecuațiile de funcționare ale acestuia și s-au calculat limitele în care se poate aduce la zero sistemul electronic și liniaritatea principiului de măsurare funcție de faza semnalului pilot.
12. S-au proiectat realizat practic și experimentat traductorul de diferență de presiune pentru gaze, traductorul de înclinare unidirecțional și bidirecțional, debitmetrul volumic pentru gaze, detectorul de debit de scăpări pentru gaze și contorul de debit volumic pentru gaze.
13. Pe tot parcursul proiectării aparatelor mai sus menționate s-a avut în vedere o modularizare a familiei de traductoare cu lichid magnetic pentru mărimi aerodinamice și înclinare în scopul avantajării producției și întreținerii în exploatare.
14. Alături de traductoarele cu rezervor vertical s-au proiectat realizat practic și experimentat și modele de traductoare cu rezervor orizontal și cu contorizare de bule de gaz.

11.3 Perspective

Modelul matematic de simulare numerică a câmpului magnetic al bobinei și programul de calcul elaborat de autor permit precizarea toleranțelor mecanice admise pentru încadrarea traductorului într-o anumită clasă de precizie. Se oferă astfel posibilitatea construirii unor traductoare pentru domenii de presiuni sau debite de gaz foarte mici. Etalonarea acestora făcută la capăt de scală (domeniu unde în general există etaloane pentru comparare) rămâne valabilă în clasa de precizie respectivă și în jurul poziției de zero (domeniu de măsurare unde procurarea etaloanelor pentru comparare este mult mai dificilă). Deci, pe baza celor prezentate pe parcursul tezei, este posibilă și realizarea de noi etaloane de măsură în domeniul presiunilor joase în gaze și în special în domeniul debitelor de gaz.

Prezența semnalului electric analogic la ieșirea acestor tipuri de traductoare și a timpului de răspuns suficient de mic, permite utilizarea lor în sisteme de reglare automată în timp real. Un exemplu pentru o astfel de aplicație îl constituie contractul de colaborare cu I.S.I.M. Timișoara, aflat în plină desfășurare, pentru reglarea debitelor de gaz în procesul de sudare. De asemenea este posibilă citirea măsurătorilor în mod centralizat de la mare distanță și printr-o prelucrare adecvată a informațiilor se poate semnaliza o eventuală scurgere de gaz într-o rețea de distribuție.

Perfecționarea, dezvoltarea și prețul acestor tipuri de traductoare sunt strict legate de perfecționarea, dezvoltarea și prețul lichidelor magnetice. De exemplu, realizarea de lichide magnetice cu permeabilitate magnetică relativă mai ridicată decât a celor actuale (cu particule de fier sau cobalt în locul particulelor de ferită) duce la simplificarea părții electronice a amplificatorului de măsură iar realizarea de lichide magnetice fără aderență la pereții rezervoarelor permite obținerea unei clase de precizie și a unui timp de răspuns a traductoarelor cu cel puțin un ordin de mărime mai bune.

* A(I,J)=Valoarea potentialului magnetic vector in coloana I si
 * linia J
 * B(I,J)=Valoarea componentei axiale a vectorului inductie
 * magnetica in coloana I si linia J
 * HR(I)=Distanta dintre nodul I si nodul I+1 (pe orizontala,
 * in dreapta nodului I)
 * HZ(J)=Distanta dintre nodul J si nodul J+1 (pe verticala,
 * deasupra nodului J)
 * R(I)=Abscisa punctelor de pe coloana I
 * Z(J)=Ordonata punctelor de pe linia J
 * JAR=Linia pe care se testeaza valoarea erorii la fiecare
 * iteratie
 * IAZ=Coloana pe care se testeaza valoarea erorii la fiecare
 * iteratie
 * AR(I)=Valoarea A(I,JAR) de la iteratia anterioara
 * AZ(J)=Valoarea A(IAZ,J) de la iteratia anterioara
 * XL(J)=Valoarea inductantei bobinei pentru cazul cand lichidul
 * magnetic se afla pana pe spira J (spirele sunt numarate
 * de jos in sus)
 * Y(J)=Ordonata punctului de pe dreapta cu care se aproximeaza
 * curba inductantei
 * ELIN(J)=Eroarea relativa de neliniaritate pentru punctul J
 * de pe curba inductantei
 * FI(J,I)=Fluxul inductiei magnetice prin spira nr. J de pe
 * stratul I
 * FIT(J)=Fluxul total al inductiei magnetice prin spirele nr. J
 * BR(I)=Abscisele componentei axiale a vectorului inductie mg.
 * PARL=Pasul retelei pe orizontala in lichid magnetic
 * PARAI=Pasul retelei in spatiul dintre lichidul magnetic si
 * bobina (pe orizontala)
 * PARB=Pasul retelei in bobina (pe orizontala)
 * PARAE=Pasul retelei intre bobina si ecran (pe orizontala)
 * PARE=Pasul retelei in ecran (pe orizontala)
 * EPS=Eroarea relativa intr-un punct la iteratia curenta
 * ER=Eroarea relativa maxima la iteratia curenta
 * NZ=Numarul de linii ale retelei exterioare bobinei in sus sau
 * in jos
 * NR=Numarul de coloane exterioare ecranului
 * NL=Numarul total de linii din reseaua de discretizare
 * NC=Numarul total de coloane din reseaua de discretizare
 * DENS=densitatea de curent prin conductor
 * ICn=Variabile de control
 * Alte variabile de control care apar in program sunt variabile
 * ajutatoare fara semnificatie fizica deosebita

12.2 Date de intrare

```
*
C                                     DATE DE INTRARE
* *****
DIMENSION A(60,440)
DIMENSION B(63,440)
DIMENSION HR(60), HZ(440), R(60), Z(440), AR(60), AZ(440)
DIMENSION XL(345), Y(345), ELIN(345), FI(345,6), BR(63)
DIMENSION FIT(345)
NS=345
NST=6
RL=3.5E-3
RB=7.5E-3
RE=10.E-3
GE=3.E-3
PMRA=1.
PMRL=4.06
PMRE=1.
N1=7
N2=8
N3=NST-1
N4=5
N5=6
N6=10
N7=1
PAZ=(100.E-3)/(NS)
ERAD=1.E-5
PI=3.1417
PMA=4*PI*1.E-7
```

12.3 Testarea rețelei de discretizare

```
*
C                                     TESTAREA REȚELEI DE DISCRETIZARE
* *****
PARB=PAZ*PI/4
DENS=1/(PI*(PAZ**2)/4)
GB=PARB*NST
10 PARL=RL/N1
PARAI=(RB-RL)/N2
PARAE=(RE-RB-GB)/N4
PARE=GE/N5
NZ=0
20 NZ=NZ+1
IF (NZ*(NZ+1)-60*RB/PAZ) 20,30,30
```

```

30  NR=0
40  NR=NR+1
    IF (NR*(NR+1)-40*RB/PARE) 40,50,50
50  NL=NS+2*NZ
    NC=N1+N2+N3+N4+N5+NR+1
    IF (NL-440) 80,80,60
60  PRINT 70, NL
70  FORMAT ( ' ', 'Numarul de linii al retelei de discretizare este pr
    !ea mare, NL=', I3)
    STOP
80  IF (NC-60) 110,110,90
90  PRINT 100, NC
100 FORMAT ( ' ', 'Numarul de coloane al retelei de discretizare este
    !prea mare, NC=', I3)
    STOP
110 PRINT 120, NL,NC,NL*NC,NZ,NR
120 FORMAT ( ' ', 'NL=', I10, /' ', 'NC=', I10, /' ', 'NL*NC=', I7, /' ', 'NZ='
    !, I10, /' ', 'NR=', I10)

```

12.4 Generarea rețelei de discretizare

```

*
C                                GENERAREA RETELEI DE DISCRETIZARE
*                                *****
*
*                                Pe orizontala
DO 130 I=1,N1
130 HR(I)=PARL
DO 140 I=N1+1,N1+N2
140 HR(I)=PARAI
DO 150 I=N1+N2+1,N1+N2+N3
150 HR(I)=PARB
DO 160 I=N1+N2+N3+1,N1+N2+N3+N4
160 HR(I)=PARAE
DO 170 I=N1+N2+N3+N4+1,N1+N2+N3+N4+N5
170 HR(I)=PARE
DO 180 I=N1+N2+N3+N4+N5+1,N1+N2+N3+N4+N5+NR
180 HR(I)=PARE*(I-(N1+N2+N3+N4+N5))
*
*                                Pe verticala
DO 190 J=1,NZ
190 HZ(J)=PAZ*(NZ+1-J)
DO 200 J=NZ+1,NZ+NS-1
200 HZ(J)=PAZ
DO 210 J=NZ+NS,2*NZ+NS-1
210 HZ(J)=PAZ*(J-NZ-NS+1)

```

```

*
*
*           Vizualizarea structurii retelei
220 OPEN (UNIT=1, FILE='HZ(J).REZ')
    DO 230 J=1,NL-1
230 WRITE (1,*) J,HZ(J)
* 240 FORMAT (' ', 'HZ(', I3, ')=' , E12.8)
    CLOSE (1)
    OPEN (UNIT=1, FILE='HR(I).REZ')
    DO 250 I=1,NC-1
250 WRITE (1,*) I,HR(I)
* 260 FORMAT (' ', 'HR(', I3, ')=' , E12.8)
    CLOSE (1)
*

```

12.5 Generarea coordonatelor

```

C
C
C           GENERAREA COORDONATELOR
*
* *****
R(1)=0
DO 270 I=2,NC
270 R(I)=R(I-1)+HR(I-1)
Z(1)=0
DO 280 J=2,NL
280 Z(J)=Z(J-1)+HZ(J-1)
*
*           Vizualizarea evolutiei coordonatelor
290 OPEN (UNIT=1, FILE='R(I).REZ')
    DO 300 I=1,NC
300 WRITE (1,*) I,R(I)
    CLOSE(1)
    OPEN (UNIT=1, FILE='Z(J).REZ')
    DO 310 J=1,NL
310 WRITE (1,*) J,Z(J)
    CLOSE(1)
*
*           Citire eventuale valori anterioare
*
* GO TO 345
* 320 OPEN (UNIT=1, FILE='A20(IJ).REZ')
* DO 340 I=1,NC
* DO 330 J=1,NL
* 330 READ (1,*) A(I,J)
* 340 CONTINUE
* CLOSE (1)
* IC1=20000
* GO TO 591

```

12.6 Înscrierea valorilor inițiale ale potențialului magnetic vector

```
*
C          INSCRIEREA VALORILOR POTENTIALULUI PE FRONTIERE
*          *****
345  CONTINUE
      DO 350 I=1,NC
      A(I,1)=0
350  A(I,NL)=0
      DO 360 J=2,NL-1
      A(1,J)=0
360  A(NC,J)=0
      DO 370 J=NZ+1,NZ+NS
      IF (J-NZ-(INT(NS/2)+1)) 365,365,367
365  A(N1+N2+1,J)=PMA*(INT(NS/4)+1)*(1+(J-NZ)*2./NS)
      GO TO 370
367  A(N1+N2+1,J)=A(N1+N2+1,NL-J+1)
370  A(N1+N2+2,J)=A(N1+N2+1,J)
*
```

12.7 Inițializarea analogică

```
C          INITIALIZAREA ANALOGICA
*          *****
      C=A(N1+N2+1,NZ+1)
      DO 515 I=2,NC-1
*
*          Initializare analogica jos
      DO 420 J=2,NZ
      IF (I-N1-N2-1) 390,410,380
380  CONTINUE
      IF (I-N1-N2-2) 410,410,400
390  A(I,J)=(C/RB)*R(I)*((Z(J)/Z(NZ+1))**10)
      GO TO 420
400  A(I,J)=C*(R(N1+N2+2)/R(I))*((Z(J)/Z(NZ+1))**10)
      GO TO 420
410  A(I,J)=C*((Z(J)/Z(NZ+1))**10)
420  CONTINUE
*
*          Initializare analogica centru
      DO 460 J=NZ+1,NZ+NS
      C=A(N1+N2+1,J)
      IF (I-N1-N2-1) 440,460,430
430  CONTINUE
      IF (I-N1-N2-2) 460,460,450
```

```

440  A(I,J)=(C/RB)*R(I)
      GO TO 460
450  A(I,J)=C*R(N1+N2+2)/R(I)
460  CONTINUE
*
*           Initializare analogica sus
      DO 510 J=NZ+NS+1,NL-1
      IF (I-N1-N2-1) 480,500,470
470  CONTINUE
      IF (I-N1-N2-2) 500,500,490
480  A(I,J)=A(I,NL-J+1)
      GO TO 510
490  A(I,J)=A(I,NL-J+1)
      GO TO 510
500  A(I,J)=A(I,NL-J+1)
510  CONTINUE
515  CONTINUE
*
*           Vizualizare A(I,J) pe axa orizontala
520  OPEN (UNIT=1, FILE='AI(NZ1).REZ')
      DO 530 I=1,NC
530  WRITE (1,*) R(I),A(I,NZ-1)
      CLOSE (1)
      OPEN (UNIT=1, FILE='AI(CJ).REZ')
      DO 540 I=1,NC
540  WRITE (1,*) R(I),A(I,NZ+(INT(NS/2)+1))
      CLOSE (1)
      OPEN (UNIT=1, FILE='AI(NS2).REZ')
      DO 550 I=1,NC
550  WRITE (1,*) R(I),A(I,NZ+NS+2)
      CLOSE (1)
*
*           Vizualizare A(I,J) pe axa verticala
      OPEN (UNIT=1, FILE='AI(LM).REZ')
      DO 560 J=1,NL
560  WRITE(1,*) Z(J),A(N1-1,J)
      CLOSE (1)
      OPEN (UNIT=1, FILE='AI(EC).REZ')
      DO 570 J=1,NL
570  WRITE (1,*) Z(J),A(N1+N2+N3+N4+2,J)
      CLOSE (1)
      OPEN (UNIT=1, FILE='AI(EX).REZ')
      DO 580 J=1,NL
580  WRITE (1,*) Z(J),A(NC-NR+2,J)
      CLOSE (1)

```

12.8 Calculul iterativ al potențialului magnetic vector prin metoda diferențelor finite

```

*
* *****
C |   CALCUL ITERATIV AL POTENTIALULUI MAGNETIC VECTOR A(I,J),   |
C |           PRIN METODA DIFERENTELOR FINITE           |
* *****
590 IC1=0
591 IAZ=N1+N2
595 JAR=NZ+N7
600 CONTINUE
    DO 610 K=2,N1+N2
610 AR(K)=A(K,JAR)
    DO 620 K=NZ-1,NZ+NS+2
620 AZ(K)=A(IAZ,K)
    DO 910 I=2,NC-1
    DO 900 J=2,NL-1
*
*                               Testarea coloanei
* *****
640 CONTINUE
    IF (I-N1-1) 700,740,650
650 CONTINUE
    IF (I-N1-N2-1) 690,770,660
660 CONTINUE
    IF (I-N1-N2-N3-1) 1500,1600,670
670 CONTINUE
    IF (I-N1-N2-N3-N4-1) 690,800,680
680 CONTINUE
    IF (I-N1-N2-N3-N4-N5-1) 830,870,690
*
*                               Testarea liniei
* *****
*
*   Calculul lui A pentru toate volumele fara densitate de curent
690 K1=(2*HR(I-1))/(HR(I)*HR(I-1)*(HR(I)+HR(I-1)))
    K2=(2*HR(I))/(HR(I)*HR(I-1)*(HR(I)+HR(I-1)))
    K3=(2*HZ(J-1))/(HZ(J)*HZ(J-1)*(HZ(J)+HZ(J-1)))
    K4=(2*HZ(J))/(HZ(J)*HZ(J-1)*(HZ(J)+HZ(J-1)))
    K5=(2*HR(I-1)*HR(I-1))/(HR(I)*HR(I-1)*(HR(I)+HR(I-1)))
    K6=(2*HR(I)*HR(I))/(HR(I)*HR(I-1)*(HR(I)+HR(I-1)))
    K7=(2*HR(I)*HR(I-1)+2*HZ(J)*HZ(J-1))/(HR(I)*HR(I-1)*HZ(J)*HZ(J-1)
!))
    K8=(HR(I-1)-HR(I))/(HR(I)*HR(I-1))
    SSUS=K1*A(I+1,J)+K2*A(I-1,J)+K3*A(I,J+1)+K4*A(I,J-1)+(1/R(I))*(K

```

```

!5*A(I+1,J)-K6*A(I-1,J))
  SJOS=K7+(1/R(I))*K8+(1/R(I))*(1/R(I))
  A(I,J)=SSUS/SJOS
  GO TO 900
*
700  CONTINUE
     IF (J-NZ+N6-1) 690,720,710
710  CONTINUE
     IF (J-NZ-N7) 690,730,690
*
*
*           Calculul lui A pentru suprafata S9/1
720  UMS=PMA*PMRL
     UMJ=PMA
     E3=UMJ*HZ(J-1)
     E4=UMS*HZ(J)
     A(I,J)=(E3*A(I,J+1)+E4*A(I,J-1))/(E3+E4)
     GO TO 900
*
*
*           Calculul lui A pentru suprafata S1/8
730  UMS=PMA
     UMJ=PMA*PMRL
     E3=UMJ*HZ(J-1)
     E4=UMS*HZ(J)
     A(I,J)=(E3*A(I,J+1)+E4*A(I,J-1))/(E3+E4)
     GO TO 900
*
740  CONTINUE
     IF (J-NZ+N6-1) 690,760,750
750  CONTINUE
     IF (J-NZ-N7) 760,760,690
*
*
*           Calculul lui A pentru suprafata S1/2
760  RX=RL
     UMDR=PMA
     UMST=PMA*PMRL
     C1=RX*UMST*HR(I-1)
     C2=RX*UMDR*HR(I)
     A(I,J)=(C1*A(I+1,J)+C2*A(I-1,J))/(HR(I)*HR(I-1)*(UMDR-UMST)+C1+C2)
     GO TO 900
*
770  CONTINUE
     IF (J-NZ-1) 690,1690,780
780  CONTINUE
     IF (J-NZ-NS) 1690,1690,690
*
1500 CONTINUE
     IF (J-NZ-1) 690,1690,1510

```

```

1510  CONTINUE
      IF (J-NZ-NS) 1690,1690,690
*
*
*           Calculul lui A pentru volumul 3
1690  K1=(2*HR(I-1))/(HR(I)*HR(I-1)*(HR(I)+HR(I-1)))
      K2=(2*HR(I))/(HR(I)*HR(I-1)*(HR(I)+HR(I-1)))
      K3=(2*HZ(J-1))/(HZ(J)*HZ(J-1)*(HZ(J)+HZ(J-1)))
      K4=(2*HZ(J))/(HZ(J)*HZ(J-1)*(HZ(J)+HZ(J-1)))
      K5=(2*HR(I-1)*HR(I-1))/(HR(I)*HR(I-1)*(HR(I)+HR(I-1)))
      K6=(2*HR(I)*HR(I))/(HR(I)*HR(I-1)*(HR(I)+HR(I-1)))
      K7=(2*HR(I)*HR(I-1)+2*HZ(J)*HZ(J-1))/(HR(I)*HR(I-1)*HZ(J)*HZ(J-1
!))
      K8=(HR(I-1)-HR(I))/(HR(I)*HR(I-1))
      SSUS=K1*A(I+1,J)+K2*A(I-1,J)+K3*A(I,J+1)+K4*A(I,J-1)+(1/R(I))*(K
!5*A(I+1,J)-K6*A(I-1,J))+PMA*DENS
      SJOS=K7+(1/R(I))*K8+(1/R(I))*(1/R(I))
      A(I,J)=SSUS/SJOS
      GO TO 900
*
*
1600  CONTINUE
      IF (J-NZ-1) 690,1690,1610
1610  CONTINUE
      IF (J-NZ-NS) 1690,1690,690
*
*
800   CONTINUE
      IF (J-NZ-1) 690,820,810
810   CONTINUE
      IF (J-NZ-NS) 820,820,690
*
*
*           Calculul lui A pentru suprafata S4/5
820   RX=RE
      UMDR=PMA*PMRE
      UMST=PMA
      C1=RX*UMST*HR(I-1)
      C2=RX*UMDR*HR(I)
      A(I,J)=(C1*A(I+1,J)+C2*A(I-1,J))/(HR(I)*HR(I-1)*(UMDR-UMST)+C1+C2)
      GO TO 900
*
*
830   CONTINUE
      IF (J-NZ-1) 690,850,840
840   CONTINUE
      IF (J-NZ-NS) 690,860,690
*
*
*           Calculul lui A pentru suprafata S9/5
850   UMS=PMA*PMRE
      UMJ=PMA
      E3=UMJ*HZ(J-1)

```



```

E4=UMS*HZ(J)
A(I,J)=(E3*A(I,J+1)+E4*A(I,J-1))/(E3+E4)
GO TO 900
*
*
*                               Calculul lui A pentru suprafata S5/7
860  UMS=PMA
      UMJ=PMA*PMRE
      E3=UMJ*HZ(J-1)
      E4=UMS*HZ(J)
      A(I,J)=(E3*A(I,J+1)+E4*A(I,J-1))/(E3+E4)
      GO TO 900
*
870  CONTINUE
      IF (J-NZ-1) 690,890,880
880  CONTINUE
      IF (J-NZ-NS) 890,890,690
*
*                               Calculul lui A pentru suprafata S5/6
890  RX=RE+GE
      UMDR=PMA
      UMST=PMA*PMRE
      C1=RX*UMST*HR(I-1)
      C2=RX*UMDR*HR(I)
      A(I,J)=(C1*A(I+1,J)+C2*A(I-1,J))/(HR(I)*HR(I-1)*(UMDR-UMST)+C1+C2)
      GO TO 900
*
900  CONTINUE
910  CONTINUE

```

12.9 Calculul erorii relative a potențialului magnetic vector

```

*
*                               CALCULUL ERORII RELATIVE
*
*****
IC1=IC1+1
IF ((N7.EQ.1).AND.(IC1.LT.60001)) GO TO 600
EPS=0
ER=0
DO 940 I=2,N1+N2
920  EPS=(A(I,JAR)-AR(I))/A(I,JAR)
      IF (ABS(EPS)-ABS(ER)) 940,940,930
930  ER=EPS
940  CONTINUE
      DO 970 J=NZ-1,NZ+NS+2
950  EPS=(A(IAZ,J)-AZ(J))/A(IAZ,J)

```

```

        IF (ABS(EPS)-ABS(ER)) 970,970,960
960    ER=EPS
970    CONTINUE
        IF (ABS(ER)-ERAD) 990,990,600
*
*           Salvare rezultate pe fisiere
990    CONTINUE
        IF (N7-1) 995,995,1075
995    OPEN (UNIT=1,FILE='AP(NZ1).REZ')
        DO 1000 I=1,NC
1000   WRITE (1,*) R(I),A(I,NZ-1)
        CLOSE (1)
        OPEN (UNIT=1, FILE='AP(CJ).REZ')
        DO 1010 I=1,NC
1010   WRITE (1,*) R(I),A(I,NZ+(INT(NS/2)+1))
        CLOSE (1)
        OPEN (UNIT=1, FILE='AP(NS2).REZ')
        DO 1020 I=1,NC
1020   WRITE (1,*) R(I),A(I,NZ+NS+2)
        CLOSE (1)
        OPEN (UNIT=1, FILE='AP(LM).REZ')
        DO 1030 J=1,NL
1030   WRITE (1,*) Z(J),A(N1-1,J)
        CLOSE (1)
        OPEN (UNIT=1, FILE='AP(EC).REZ')
        DO 1040 J=1,NL
1040   WRITE (1,*) Z(J),A(N1+N2+N3+N4+2,J)
        CLOSE (1)
        OPEN (UNIT=1, FILE='AP(EX).REZ')
        DO 1050 J=1,NL
1050   WRITE (1,*) Z(J),A(NC-NR+2,J)
        CLOSE (1)
        OPEN (UNIT=1, FILE='AS23.REZ')
        DO 1051 J=1,NL
1051   WRITE (1,*) Z(J),A(N1+N2+1,J)
        CLOSE (1)
        OPEN (UNIT=1, FILE='AV3.REZ')
        DO 1052 J=1,NL
1052   WRITE (1,*) Z(J),A(N1+N2+N3,J)
        CLOSE (1)
        OPEN (UNIT=1, FILE='A60(IJ).REZ')
        DO 1070 I=1,NC
        DO 1060 J=1,NL
1060   WRITE (1,*) A(I,J)
1070   CONTINUE
        CLOSE (1)

```

12.10 Calculul componentei axiale a inducției magnetice

```

*
C          CALCULUL COMPONENTEI AXIALE A INDUCTIEI MAGNETICE B(I,J)
*          *****
1075      CONTINUE
          DO 1080 I=1,NC+3
          B(I,1)=0
1080      B(I,NL)=0
*
*          B pe frontiera din stanga in mediul 1
*          (calculat cu derivata spre dreapta)
          DO 1140 J=2,NL-1
          B(1,J)=2*(A(2,J)-A(1,J))/HR(1)
*
*          B pe suprafata S1/2 in mediul 1
*          (calculat cu derivata spre stanga)
          IC2=N1+1
          B(IC2,J)=A(IC2,J)/R(IC2)+(A(IC2,J)-A(IC2-1,J))/HR(IC2-1)
*
*          B in volumul 1 (si corespunzator 9,8 si 7)
*          (calculat cu derivata la centru)
          DO 1090 IC2=2,N1
          K1=(2*HR(IC2-1))/(HR(IC2)*HR(IC2-1)*(HR(IC2)+HR(IC2-1)))
          K2=(2*HR(IC2))/(HR(IC2)*HR(IC2-1)*(HR(IC2)+HR(IC2-1)))
          K8=(HR(IC2-1)-HR(IC2))/(HR(IC2)*HR(IC2-1))
1090      B(IC2,J)=A(IC2,J)/R(IC2)+(A(IC2+1,J)*K1*HR(IC2-1)-A(IC2-1,J)*K2*
          !HR(IC2))/2-A(IC2,J)*K8
*
*          B pe suprafata S1/2 in mediul 2
*          (calculat cu derivata spre dreapta)
          IC2=N1+1
          B(IC2+1,J)=A(IC2,J)/R(IC2)+(A(IC2+1,J)-A(IC2,J))/HR(IC2)
*
*          B pe suprafata S4/5 in mediul 4
*          (calculat cu derivata spre stanga)
          IC2=N1+N2+N3+N4+1
          B(IC2+1,J)=A(IC2,J)/R(IC2)+(A(IC2,J)-A(IC2-1,J))/HR(IC2-1)
*
*          B in volumele 2, 3 si 4 (si corespunzator 9 si 7)
*          (calculat cu derivata la centru)
          DO 1110 IC2=N1+2,N1+N2+N3+N4
          K1=(2*HR(IC2-1))/(HR(IC2)*HR(IC2-1)*(HR(IC2)+HR(IC2-1)))
          K2=(2*HR(IC2))/(HR(IC2)*HR(IC2-1)*(HR(IC2)+HR(IC2-1)))
          K8=(HR(IC2-1)-HR(IC2))/(HR(IC2)*HR(IC2-1))

```

```

1110  B(IC2+1,J)=A(IC2,J)/R(IC2)+(A(IC2+1,J)*K1*HR(IC2-1)-A(IC2-1,J)*K
!2*HR(IC2))/2-A(IC2,J)*K8
*
*           B pe suprafata S4/5 in mediul 5
*           (calculat cu derivata spre dreapta)
IC2=N1+N2+N3+N4+1
B(IC2+2,J)=A(IC2,J)/R(IC2)+(A(IC2+1,J)-A(IC2,J))/HR(IC2)
*
*           B pe suprafata S5/6 in mediul 5
*           (calculat cu derivata spre stanga)
IC2=N1+N2+N3+N4+N5+1
B(IC2+2,J)=A(IC2,J)/R(IC2)+(A(IC2,J)-A(IC2-1,J))/HR(IC2-1)
*
*           B in volumul 5 (si corespunzator 9 si 7)
*           (calculat cu derivata la centru)
DO 1120 IC2=N1+N2+N3+N4+2,N1+N2+N3+N4+N5
K1=(2*HR(IC2-1))/(HR(IC2)*HR(IC2-1)*(HR(IC2)+HR(IC2-1)))
K2=(2*HR(IC2))/(HR(IC2)*HR(IC2-1)*(HR(IC2)+HR(IC2-1)))
K8=(HR(IC2-1)-HR(IC2))/(HR(IC2)*HR(IC2-1))
1120  B(IC2+2,J)=A(IC2,J)/R(IC2)+(A(IC2+1,J)*K1*HR(IC2-1)-A(IC2-1,J)*K
!2*HR(IC2))/2-A(IC2,J)*K8
*
*           B pe suprafata S5/6 in mediul 6
*           (calculat cu derivata spre dreapta)
IC2=NC-NR
B(IC2+3,J)=A(IC2,J)/R(IC2)+(A(IC2+1,J)-A(IC2,J))/HR(IC2)
*
*           B pe frontiera din dreapta in mediul 6
*           (calculat cu derivata spre stanga)
IC2=NC
B(IC2+3,J)=A(IC2,J)/R(IC2)+(A(IC2,J)-A(IC2-1,J))/HR(IC2-1)
*
*           B in volumul 6 (si corespunzator 9 si 7)
*           (calculat cu derivata la centru)
DO 1130 IC2=N1+N2+N3+N4+N5+2,NC-1
K1=(2*HR(IC2-1))/(HR(IC2)*HR(IC2-1)*(HR(IC2)+HR(IC2-1)))
K2=(2*HR(IC2))/(HR(IC2)*HR(IC2-1)*(HR(IC2)+HR(IC2-1)))
K8=(HR(IC2-1)-HR(IC2))/(HR(IC2)*HR(IC2-1))
1130  B(IC2+3,J)=A(IC2,J)/R(IC2)+(A(IC2+1,J)*K1*HR(IC2-1)-A(IC2-1,J)*K
!2*HR(IC2))/2-A(IC2,J)*K8
*
1140  CONTINUE
      IF (N7-1) 1145,1145,1147
*
*           Vizualizare inductie pe verticala
1145  OPEN (UNIT=1, FILE='B(LM).REZ')
      DO 1320 J=1,NL

```

```

1320 WRITE (1,*) Z(J),B(N1-1,J)
      CLOSE (1)
      OPEN (UNIT=1, FILE='B(EC).REZ')
      DO 1330 J=1,NL
1330 WRITE (1,*) Z(J),B(N1+N2+N3+N4+6,J)
      CLOSE (1)
      OPEN (UNIT=1, FILE='B(EX).REZ')
      DO 1340 J=1,NL
1340 WRITE (1,*) Z(J),B(NC-NR+7,J)
      CLOSE (1)
      OPEN (UNIT=1, FILE='B(AI).REZ')
      DO 1341 J=1,NL
1341 WRITE (1,*) Z(J),B(N1+N2+1,J)
      CLOSE (1)
      OPEN (UNIT=1, FILE='B(AE).REZ')
      DO 1342 J=1,NL
1342 WRITE (1,*) Z(J),B(N1+N2+N3+5,J)
      CLOSE (1)
      OPEN (UNIT=1, FILE='BS23.REZ')
      DO 1343 J=1,NL
1343 WRITE (1,*) Z(J),B(N1+N2+2,J)
      CLOSE (1)
      OPEN (UNIT=1, FILE='BV3.REZ')
      DO 1344 J=1,NL
1344 WRITE (1,*) Z(J),B(N1+N2+N3+2,J)
      CLOSE (1)

```

*

12.11 Generarea absciselor pentru inducția magnetică

* Generarea absciselor pentru inductia magnetica

```

DO 1350 I=1,N1+1
1350 BR(I)=R(I)
      DO 1365 I=N1+1,N1+N2+N3+N4+1
1365 BR(I+1)=R(I)
      DO 1366 I=N1+N2+N3+N4+1,N1+N2+N3+N4+N5+1
1366 BR(I+2)=R(I)
      DO 1367 I=N1+N2+N3+N4+N5+1,NC
1367 BR(I+3)=R(I)

```

*

* Vizualizare inductie pe orizontala

```

OPEN (UNIT=1, FILE='B(NZ1).REZ')
DO 1370 I=1,NC+3
1370 WRITE (1,*) BR(I), B(I,NZ-1)
      CLOSE (1)
      OPEN (UNIT=1, FILE='B(CJ).REZ')

```

```

DO 1380 I=1,NC+3
1380 WRITE (1,*) BR(I), B(I,NZ+(INT(NS/2)+1))
CLOSE (1)
OPEN (UNIT=1, FILE='B(NS2).REZ')
DO 1390 I=1,NC+3
1390 WRITE (1,*) BR(I), B(I,NZ+NS+2)
CLOSE (1)

```

12.12 Calculul inductanței bobinei

```

*
C                               CALCULUL INDUCTANTEI BOBINEI
*                               *****
1147 CONTINUE
DO 1880 J=NZ+1,NZ+NS
FIL=0
DO 1150 I=1,N1
1150 FIL=((B(I,J)+B(I+1,J))/2)*PI*(R(I+1)**2-R(I)**2)+FIL
FIA=0
DO 1160 I=N1+1,N1+N2
1160 FIA=((B(I+1,J)+B(I+2,J))/2)*PI*(R(I+1)**2-R(I)**2)+FIA
FI(J-NZ,1)=FIL+FIA
DO 1870 IC3=1,N3-1
I=N1+N2+IC3
FIC=((B(I+1,J)+B(I+2,J))/2)*PI*(R(I+1)**2-R(I)**2)
1870 FI(J-NZ,IC3+1)=FI(J-NZ,IC3)+FIC
1880 CONTINUE
DO 1900 J=1,NS
FIT(J)=0
DO 1890 I=1,N3
1890 FIT(J)=FIT(J)+FI(J,I)
1900 CONTINUE
IF (N7-(INT(NS/2)+1)) 1180,1420,1180
1420 OPEN (UNIT=1, FILE='FIT(J).REZ')
DO 1430 J=1,NS
1430 WRITE (1,*) J,FIT(J)
CLOSE (1)
GO TO 1180
1180 XL(N7)=0
DO 1190 J=1,NS
1190 XL(N7)=XL(N7)+FIT(J)
N7=N7+1
IF (N7-NS) 1200,1200,1280
1200 IC1=0
GO TO 595

```

12.13 Calculul erorii relative de neliniaritate a inductanței bobinei

```
*
C          CALCULUL ERORII RELATIVE DE NELINIARITATE
*          *****
1280      TAN=(XL(INT(NS/2)+1+50)-XL(INT(NS/2)+1-50))/(100)
          DO 1290 J=1,NS
          Y(J)=XL(INT(NS/2)+1)+(J-INT(NS/2)-1)*TAN
1290      ELIN(J)=ABS((XL(J)/Y(J)-1)*100)
*
*          Vizualizari rezultate
          OPEN (UNIT=1, FILE='ELIN.REZ')
          DO 1300 J=1,NS
1300      WRITE (1,*) J,ELIN(J)
          CLOSE (1)
          OPEN (UNIT=1, FILE='XL(N7).REZ')
          DO 1310 J=1,NS
1310      WRITE (1,*) J, XL(J)
          CLOSE (1)
          STOP
          END
```

Bibliografie

- [1] R.E.Rosensweig, *Fluid dynamics and science of magnetic liquids*, Adv. Electron. Electron. Phys.,48(1979) 103 – 199.
- [2] R.E.Rosensweig, *Ferrohydrodynamics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1985.
- [3] E.Luca, Gh.Călugăru, R.Bădescu, C.Cotae, V.Bădescu, *Ferofluidele și aplicațiile lor în industrie*, Ed. Tehnică, București, 1978.
- [4] Gh.Călugăru, C.Cotae, *Lichide magnetice*, Ed. Științifică și Enciclopedică, București, 1978.
- [5] I.Anton, L.Vékás, *Aplicațiile ferofluidelor în tehnica modernă*, Seminarul tehnico-științific ”Aplicațiile ferofluidelor”, Timișoara, 1980, pag. 87.
- [6] I.Anton, I.De Sabata, L.Vékás, *Aplicații ale fluidelor magnetice în domeniul aparatelor de măsură, traductoarelor și senzorilor*, Conf. MHH, vol.7, *Fluide magnetice și aplicațiile lor*, Timișoara, 1985, pag. 141 – 150
- [7] R.L.Bailey, *Lesse known application of ferrofluids*, J. Magn .Magn .Mater., Vol. 39,(1983),178.
- [8] I.Anton, L.Vékás, D.Bica, *Fluide magnetice. Structura și unele aplicații*. St. Cerc. Mec. Apl. 43, 1984, pag. 451.
- [9] I.Anton, I.De Sabata, L.Vékás, *Application orientated researches on magnetic fluids*. Proceedings of the Fifth Internațional Conference on Magnetic Fluids, september 1989 Riga, USSR, (Invited Paper), J. Magn. Magn. Mater. 85(1990) 219 – 226.
- [10] K.Raj, R.Moscovitz, *Commercial applications of ferrofluids*, J. Magn .Magn .Mater.. Vol. 85,(1990), 233 – 245.
- [11] J.C.Bacri, R.Perzinski, *Magnetic Fluids in Devices*, Proc. European Advanced Short Course on Magnetic Fluids and Powders – New Technological Materials. Minsk. Belarus, May 20 – 31, 1991.
- [12] I.Anton, I.De Sabata, L.Vékás, *Tendințe actuale în domeniul lichidelor magnetice*. Conf. MHH, vol.6, *Lichide magnetice*, Timișoara, 1990, pag. 1.
- [13] I.Anton, I.De Sabata, L.Vékás, I.Potencz, Doina Bica, **N.C.Popa**, V.Sofonea, L.Broștean, *Some Results Concerning the Preparation. Microstructure. Properties and Applications of Magnetic Fluids*, Buletinul Științific și Tehnic al Universității Tehnice din Timișoara, Tom 40(54), Electrotehnică, 1995, pag. 17 – 34

- [14] I. Anton, I. De Sabata, I. Potencz, L. Vékás, **N.C. Popa**, L. Broștean, *Unele aplicații tehnice ale lichidelor magnetice*, Simpozion I.C.P.E., București, octombrie 1995, (în curs de apariție).
- [15] V. Cabuil, S. Neveu, R. Rosensweig, *Introduction to the Magnetic Fluids Bibliography*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 122 (1993) 437.
- [16] L. Vékás, M. Piso, *Romanian Magnetic Fluids Bibliography*, Proceedings of the IV-th Workshop on Magnetic Fluids and Applications, Technical University of Timișoara, June 30 – July 1, 1994.
- [17] G. Ionescu, *Măsurări și Traductoare, vol. I*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1985.
- [18] Cosmina-Elena Ștețiu, C. Oprean, *Măsurări geometrice în construcția de mașini*, Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1988.
- [19] E. Nicolau, ș.a., *Manualul inginerului electronist. Măsurări electronice*, Editura Tehnică, București, 1979.
- [20] E. Nicolau, Maria Beliş, *Măsurări electrice și electronice*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1979.
- [21] A. Millea, *Măsurări electrice. Principii și metode*, Editura Tehnică, București, 1980.
- [22] A. Millea, *Cartea metrologului. Metrologie generală*, Editura Tehnică, București, 1985.
- [23] L. Ochiană, *Contribuții teoretice și experimentale privind traductoarele inductive de forță și deplasare*, Teză de doctorat, I. Politehnic București, 1988.
- [24] I. Potencz, E. Suci, L. Vékás, *Magnetofluidic transducers for low pressure differences*, Rev. Roum. Sci. Tech. Mec. Appl., 30(1985) 323 - 329.
- [25] A.E.M. – S.A. Timișoara, *Traductoare cu lichide magnetice*, Catalog de produse 1991.
- [26] Y. Kanamaru, T. Fumino, J. Kanamoto, S. Notsu, *Characteristics of level and two axis attitude detector using magnetic fluid*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-23. No.5, September 1987, pag. 2203 – 2205.
- [27] D. Rău, *Metodă și traductor de măsurare a înclinării*, Brevet RO 80221, 1982.
- [28] R. Olaru, C. Cotae, I. Grosu, Gh. Călugăru, *Investigation of an inclination ferrofluid transducer*, J. Magn. Magn. Mater., Vol.35, 1983, pag. 162 – 164
- [29] M.I. Piso, H. Minti, A. Aciu, L. Popovici, *Limitator de vibrații cu fluid magnetic*. Conf. MHH, vol.7, Fluide magnetice și aplicațiile lor, Timișoara, 1985, pag. 159.
- [30] R. Olaru, C. Cotae, *Diferential inductive transducer*, Magnetic Fluids, Fifth International Conference, Riga, 1989, pag. 224.

- [31] M.I.Piso, V.Dobrotescu, S.Mamulea, S.Slatculescu, *Aplicatii ale lichidelor magnetice in sistemele de navigatie inertiala* (Magnetic fluids applications in inertial guidance systems), Conf. MHH, vol.6, Lichide magnetice, Timișoara, 1990, pag. 87.
- [32] K.Komiya, I.Itoh, M.Furoh, *An inclinometer using magnetic fluid*, J.Phys.E: Sci.Instrum.21(1988) 437 – 439.
- [33] Y.Kanamaru, A.Kojima, *Characteristics of level and two-axis attitude detector A using magnetic fluid*, J.Appl.Phys.69(8),15 April 1991, pag. 5057 – 5099.
- [34] J.C.Bacri, R.Perzynski, D.Salin, J.Servais, *Magnetic fluid sensors: inclinometer and accelerometer*, International Journal of Applied Electromagnetics in Materials 2(1991) 197 – 206.
- [35] K.Komiya, I.Itoh, I.H.Gashi, *New pressure sensing method by use of magnetic fluid*, Rev.Sci.Instrum.63(7), July 1992, pag. 3677 – 3680.
- [36] **N.C.Popa**, I.Potencz, L.Vékás, G.Giula, *Traductor pentru măsurarea înclinărilor față de orizontală*, Brevet RO 98430, 1989.
- [37] I.Potencz, **N.C.Popa**, L.Vékás, E.Suciu, A.Melinte, *Traductor pentru măsurarea diferențelor mici de presiune*, Brevet RO 98431, 1989.
- [38] I.De Sabata, *Bazele Electrotehnicii*, vol. I, Universitatea Tehnică din Timișoara, Curs 1972.
- [39] I.De Sabata, *Bazele Electrotehnicii*, vol. II, Universitatea Tehnică din Timișoara, Curs 1974.
- [40] A.Colțeu, Teză de doctorat, I.P.T.V.Timișoara, 1976.
- [41] I.De Sabata, **N.C.Popa**, *Calculul inductivității unei bobine în mediu eterogen folosind inducția magnetică pe o axă a bobinei*, Conferința de Mașini Hidraulice și Hidrodinamică, Universitatea Tehnică Timișoara, sept. 1990, pag. 97 – 106.
- [42] **N.C.Popa**, I.De Sabata, I.Potencz, L.Vékás, *Metodă de dimensionare a unor transductoare inductive cu lichid magnetic*, Conferința Mașini Hidraulice și Hidrodinamică, Universitatea Tehnică Timișoara, sept. 1990, pag. 107 – 113.
- [43] Pl.Andronescu, *Bazele Electrotehnicii*, vol. I, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1972.
- [44] K.Simonyi, *Electrotehnică Teoretică*, Editura Tehnică, București, 1974.
- [45] I.De Sabata, **N.C.Popa**, *Inductance d'une spire circulaire plane, située dans un milieu hétérogène et ayant sa surface parallèle à la surface de séparation des milieux*. Buletinul Științific și Tehnic al Universității Tehnice din Timișoara, Tomul 38(52). Electrotehnică, Electronică și Telecomunicații, 1993, pag. 1 – 6.
- [46] U.T.Timișoara – **C.C.H.C.L.M.**, *Procese microstructurale, proprietăți și unele aplicații ale lichidelor magnetice*, Protocol la Contractul de Cercetare Științifică nr. 1030 B /1993, faza 1994, beneficiar Ministerul Cercetării și Tehnologiei.

- [47] **N.C.Popa**, I.De Sabata, R.Potencz, *The calculus of the inductance for a coil of real current loops, vertically and partially immersed in magnetic liquid*, Romanian Reports in Physics, Vol. 3-5, 1995, (în curs de apariție)
- [48] **N.C.Popa**, *Electronic measuring system for inductive transducers with magnetic fluids*, Proceedings of the International Symposium on Signals, Circuits and Systems SCS'93, 4-5 nov. 1993, Iași, Romania, pag. 443 – 446.
- [49] **N.C.Popa**, *Some characteristics of the electronic measuring system for inductive transducers with magnetic fluid core*, Proceedings of the International Symposium on Signals, Circuits and Systems SCS'93, 4-5 nov. 1993, Iași, Romania, pag. 447 – 450.
- [50] **N.C.Popa**, *Calculul numeric al traductoarelor cu lichid magnetic. Verificări experimentale.* - Referat intern, U.T.T.- Cat. de Electrotehnică, 1993.
- [51] U.T.Timișoara – **C.C.H.C.L.M.**, *Procese microstructurale, proprietăți și unele aplicații ale lichidelor magnetice*, Protocol la Contractul de Cercetare Științifică nr. 1030 B /1993, faza 1993, beneficiar Ministerul Cercetării și Tehnologiei.
- [52] C.Șora, *Bazele electrotehnicii*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1982.
- [53] **N.C.Popa**, *Calculul vectorului inducție magnetică într-un punct oarecare din vecinătatea unei spire circulare plane, aflată în mediu neomogen*, Analele Universității din Oradea, Fascicola Electrotehnică, 1993, pag. 94 – 101.
- [54] **N.C.Popa**, *Calculul vectorului inducție magnetică într-un punct oarecare din vecinătatea unei bobine uniforme de secțiune circulară. aflată în mediu neomogen*, Analele Universității din Oradea, Fascicola Electrotehnică, 1993, pag. 106 – 113.
- [55] I.M.Rîjic, I.S.Gradștein, *Tabele de integrale, sume, serii și produse*, Editura Tehnică, București, 1955.
- [56] **N.C.Popa**, I.De Sabata, R.Potencz, *The calculus of the inductance for a coil of filiform current loops, vertically and partially immersed in magnetic liquid*, Romanian Reports in Physics, Vol. 3-5, 1995, (în curs de apariție)
- [57] **N.C.Popa**, *Calculul fluxului magnetic ce înlanțuie spirele unei bobine uniforme de secțiune circulară, aflată în mediu neomogen*, Analele Universității din Oradea, Fascicola Electrotehnică, 1994, pag. 134 – 141.
- [58] **N.C.Popa**, *Calculul inductanței unei bobine uniforme de secțiune circulară, aflată în mediu neomogen*, Analele Universității din Oradea, Fascicola Electrotehnică, 1994, pag. 126 – 133.
- [59] M.Roșculeț, *Analiză matematică*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1984.
- [60] U.T.Timișoara – **C.C.H.C.L.M.**, *Aplicarea fluidelor magnetice la realizarea de traductoare și dispozitive de detecție cu sensibilitate ridicată* Protocol la Contractul de Cercetare Științifică nr. 203/1987, beneficiar I.C.P.E. București.

- [61] U.T.Timișoara – **C.C.H.C.L.M.**, *Aplicații ale fluidelor magnetice în domeniul construcției de aparate și traductoare de măsură*, Protocol la Contractul de Cercetare Științifică nr. 95/1987, faza 1987, beneficiar AEM-SA Timișoara.
- [62] U.T.Timișoara – **C.C.H.C.L.M.**, *Aplicații ale fluidelor magnetice în domeniul construcției de aparate și traductoare de măsură*, Protocol la Contractul de Cercetare Științifică nr. 95/1987, faza 1988, beneficiar AEM-SA Timișoara.
- [63] U.T.Timișoara – **C.C.H.C.L.M.**, *Cercetări asupra caracteristicilor constructive și funcționale ale unor traductoare și aparate de măsurat cu lichid magnetic*, Protocol la Contractul de Cercetare Științifică nr. 29/1989, faza 1989, beneficiar AEM-SA Timișoara.
- [64] U.T.Timișoara – **C.C.H.C.L.M.**, *Cercetări privind obținerea de lichide magnetice biocompatibile și concepția și realizarea de dispozitive de măsură și etanșări mobile cu lichid magnetic pentru tehnologii chimice*, Protocol la Contractul de Cercetare Științifică nr. 157/1989, beneficiar Centrul de Chimie Timișoara.
- [65] U.T.Timișoara – **C.C.H.C.L.M.**, *Cercetări asupra caracteristicilor constructive și funcționale ale unor traductoare și aparate de măsurat cu lichid magnetic*, Protocol la Contractul de Cercetare Științifică nr. 29/1989, faza 1990, beneficiar AEM-SA Timișoara.
- [66] U.T.Timișoara – **C.C.H.C.L.M.**, *Cercetări privind obținerea și caracterizarea structurii și proprietăților unor fluide magnetice pentru dispozitive de măsurare în domeniul gravitației*, Protocol la Contractul de Cercetare Științifică nr. 161/1990, beneficiar I.G.S.S. București.
- [67] U.T.Timișoara – **C.C.H.C.L.M.**, *Cercetări asupra aplicațiilor fluidelor magnetice în dispozitive de măsură ultrasensibile în domeniul gravitației*, Protocol la Contractul de Cercetare Științifică nr. 91/1991, beneficiar I.G.S.S. București.
- [68] U.T.Timișoara – **C.C.H.C.L.M.**, *Lichide magnetice speciale și unele aplicații în tehnică și biologie*, Protocol la Contractul de Cercetare Științifică nr. 6270/1991, beneficiar M.I.S.-București.
- [69] U.T.Timișoara – **C.C.H.C.L.M.**, *Procese microstructurale, proprietăți și unele aplicații ale lichidelor magnetice*, Protocol la Contractul de Cercetare Științifică nr. M.I.S. 414/1992, faza 1992.
- [70] Gh.Mândru, M.M.Rădulescu, *Analiza numerică a câmpului electromagnetic*. Editura Dacia Cluj - Napoca, 1986.
- [71] I.Gh.Șabac, *Matematici speciale*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1981.
- [72] C.I.Mocanu, *Teoria câmpului electromagnetic*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1981.
- [73] U.T.Timișoara – **C.C.H.C.L.M.**, *Procese microstructurale, proprietăți și unele aplicații ale lichidelor magnetice*, Protocol la Contractul de Cercetare Științifică nr. 1030 B /1993, faza 1995, beneficiar Ministerul Cercetării și Tehnologiei.

- [74] B.Nicoară, *Asupra determinării experimentale a susceptivității initiale a fluidelor magnetice*, Conf. MHH, vol.7, Fluide magnetice și aplicațiile lor, Timișoara, 1985, pag. 31.
- [75] P.L.Kalantarov, L.A.Teitlin, *Calculul inductanțelor*, Editura Tehnică 1958.
- [76] **N.C.Popa**, I.De Sabata, *Numerical simulation for electrical coils of inductive transducers with magnetic liquids*, 1st European Magnetic Sensors and Actuators Conference, EMSA'96 - Abstracts, Sensors and Actuators A, 1997 (acceptată pentru publicare).
- [77] I.De Sabata, **N.C.Popa**, I.Potencz, L.Vékás, *Inductive transducers with magnetic fluids*, Proceedings of *Euroensors V*. September 30 - October 02, 1991, Rome. Italy. Volume 2, editor A.D'Amico, Sensors and Actuators A, 32(1992) 678 – 681.
- [78] **N.C.Popa**, *Aplicații ale traductoarelor cu lichid magnetic*. - Referat intern, U.T.T.-Cat. de Electrotehnică, 1994.
- [79] I.Potencz, E.Suciu, L.Vékás, *Traductoare magnetofluidice de presiune* Conf. MHH, vol.7, Fluide magnetice și aplicațiile lor, Timișoara, 1985, pag. 151.
- [80] **N.C.Popa**, I.Potencz, *Aparate magnetofluidice pentru controlul pe linii automatizate al porozității unor piese realizate prin turnare*, Conferința Internațională Noutăți în Domeniul Tehnologiilor și Utilajelor pentru Prelucrare la Cald a Metalelor, vol. 1, Tehnologii și Utilaje pentru Elaborare și Turnare, Universitatea Transilvania Brașov, 29 - 30 apr. 1993, pag. 346 – 353.
- [81] R.Răduleț, *Bazele electrotehnicii. Probleme*, Vol. II, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1981.
- [82] I.E.M.I.- București, *Tensometru electronic cu un canal tip N 2301. Carte tehnică*.
- [83] I.Anton, A.Dreucean, L. Vékás, I. Potencz, M. Ghita, Gh. Paulescu, *Comparator pneumatic magnetofluidic de mare precizie*, A V-a Conf. Naț. de Tehnologii Neconvenționale în Prelucrarea Materialelor, CNTN, 1989, pag. 300 – 304.
- [84] A.Dreucean, Gh.Paulescu, *Curbele caracteristice ale unui model experimental de comparator pneumatic magnetofluidic de mare precizie*, A V-a Conf. Naț. de Tehnologii Neconvenționale în Prelucrarea Materialelor, CNTN, 1989, pag. 304 – 309.
- [85] A.Dreucean, *Dinamometru cu traductor pneumo-magnetofluidic. Partea I*, Conf. MHH, vol.6, Lichide magnetice, Timișoara, 1990, pag. 114.
- [86] A.Dreucean, *Dinamometru cu traductor pneumo-magnetofluidic. Partea a II-a*, Conf. MHH, vol.6, Lichide magnetice, Timișoara, 1990, pag. 118.
- [87] **N.C.Popa**, I.Potencz, L.Broștean, L.Vékás, *Some applications of inductive transducers with magnetic liquids*, 1st European Magnetic Sensors and Actuators Conference, EMSA'96 - Abstracts, Sensors and Actuators A, 1997 (acceptată pentru publicare).

- [88] **N.C.Popa**, I.Potencz, L.Vékás, *Magnetic fluid flow meter for gases*, Proceedings of *EMMA '93*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 30, No.2, March 1994, pag. 936 – 938.
- [89] G.Băjeu, Gh.Stancu, *Generatoare de semnale sinusoidale*. Editura Tehnică, București, 1979.
- [90] A.Vătășescu, ș.a., *Circuite cu semiconductoare în industrie. Amplificatoare și oscilatoare* Editura Tehnică, București, 1971.
- [91] M.Ciugudean, ș.a., *Circuite integrate liniare. Aplicații*, Editura Facla, Timișoara, 1986.
- [92] R.Rîpeanu, ș.a., *Circuite integrate analogice*, Editura Tehnică, București, 1983.
- [93] I.Microelectronica, *Data Book. MOS and Optoelectronic Devices*, First edition, 1985.
- [94] I.Microelectronica, *Data Book. MOS Integrated Circuits*, Second Edition, 1989.
- [95] I.Ardelean, ș.a., *Circuite integrate CMOS. Manual de utilizare*, Editura Tehnică, București, 1986.
- [96] Th.Dănilă, ș.a., *Dispozitive și circuite electronice*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1982.
- [97] D.Dascălu, ș.a., *Dispozitive și circuite electronice*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1982.
- [98] I.C.C.E.-București, *Catalog general scurt*, 1986.
- [99] I.Potencz, E.Suciu, L.Vékás, *Comutator pentru fluide*, Brevet RO 94884, 1984.
- [100] I.E.M.I. - București, *Numărător universal cu 7 cifre tip E 0202. Carte tehnică*.
- [101] **N.C.Popa**, I.Potencz, I.Anton, L.Vékás, *Magnetic liquid sensor for very low gas flow rate with magnetic flow adjusting possibility*, 1st European Magnetic Sensors and Actuators Conference, EMSA'96 - Abstracts, Sensors and Actuators A, 1997 (acceptată pentru publicare).
- [102] H.Oka, *A microgas flow sensor using magnetic fluid*, Fourth International Conference on Magnetic Fluids, Abstracts, p. 126-127(1986), Tokyo.
- [103] J.P.Carrico, *Pressure sensors utilising ferromagnetic fluids*, Patent S.U.A. 3946177, 1976.