

UNIVERSITATEA „ȘTEFAN CEL MARE” SUCEAVA
FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ ȘI ȘTIINȚA CALCULATOARELOR
Domeniul: Inginerie Electrică

**CONTRIBUȚII TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE CU
PRIVIRE LA UNELE EFECTE PARTICULARE ÎN
DOMENIUL PULBERILOR FEROMAGNETICE ȘI AL
FEROFLUIDELOR**

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

Conducător științific:

Prof. univ. dr. ing. Dorel CERNOMAZU

Prof. univ. dr. ing. Dan Laurențiu MILICI

Autor:

Ing. Ovidiu-Magdin ȚANȚA

CUPRINS

	Pagină teză	Pagină rezumat
INTRODUCERE	7	3
ABREVIERI	11	
CAPITOLUL 1		
Stadiul actual al cercetărilor în domeniul ferrofluidelor și rezultate obținute în cadrul USV	13	5
1.1 Fenomene specifice ferrofluidelor	13	5
1.1.1 Teorema lui Earnshaw	14	
1.1.2 Levitația de speța întâi	15	
1.1.3 Levitația de speța a doua	17	
1.2 Utilizări ale ferrofluidelor în tehnică	19	5
1.3 Aplicații cu ferrofluide concepute în cadrul Centrului de Cercetare EMAD	21	6
1.3.1 Comportarea lichidelor magnetice sub acțiunea câmpului magnetic învârtitor – figurile CEUS	21	
1.3.2 Diagnosticarea defectelor la rotoarele în colivie	22	
1.3.3 Indicatoare de sens cu ferrofluid	23	
1.3.4 Stand pentru studiul stabilității ferrofluidelor în câmp magnetic	23	
1.3.5 Stand pentru evidențierea profilului hidrostatic al ferrofluidelor	24	
1.3.6 Magnetizarea unui ferrofluid în câmpuri magnetice de joasă intensitate	25	
1.3.7 Micropompe cu ferrofluid	26	
1.4 Concluzii	27	
CAPITOLUL 2		
Contribuții privind verificarea comportării pulberilor și lichidelor magnetice supuse câmpului magnetic învârtitor de frecvență variabilă	29	7
2.1 Considerații generale	29	
2.2 Studiul efectelor specifice câmpului magnetic învârtitor de frecvență variabilă	32	7
2.2.1 Materiale utilizate	33	
2.2.2 Verificarea efectului Kagan cu ajutorul pulberilor feromagnetice	35	7
2.2.3 Studii privind câmpul magnetic învârtitor de frecvență variabilă	36	8
2.2.4 Agitator electromecanic cu acțiune dublă	40	9
2.2.5 Utilizarea tehnicilor psihologice de creație în scopul realizării unor noi variante constructive ale agitatorului electromecanic	42	10
2.3 Concluzii	45	
CAPITOLUL 3		
Contribuții la realizarea unor aplicații bazate pe profilul hidrostatic al ferrofluidului în jurul unui curent vertical	47	12
3.1 Aspecte introductive	47	
3.2 Studiul profilului hidrostatic al unui ferrofluid	52	12
3.3 Diagnosticarea defectelor coliviei rotorice la motoarele asincrone	56	
3.3.1 Aspecte generale privind tehnologia de realizare a rotoarelor în colivie	56	
3.3.2 Probleme legate de funcționarea motorului asincron cu înfășurarea rotorică dezechilibrată	57	
3.3.3 Contribuții la realizarea unui dispozitiv de diagnosticare a coliviei rotorice cu ajutorul ferrofluidului	59	13
3.4 Concluzii	62	

CAPITOLUL 4

Studiu comparativ privind verificarea figurilor CEUS obținute cu o suspensie de particule feromagnetice față de un ferrofluid profesional.....	63	16
4.1 Generalități.....	63	
4.1.1 Motorul GROSU.....	64	
4.1.2 Varianta GROSU-CERNOMAZU.....	65	
4.1.3 Scheme de conexiuni speciale.....	66	
4.2 Contribuții privind obținerea figurilor CEUS cu ajutorul unui ferrofluid.....	68	16
4.2.1 Figuri CEUS obținute cu un motor GROSU cu înfășurare trifazată conectată în stea.....	68	16
4.2.2 Figuri CEUS captate cu un motor GROSU cu înfășurare trifazată conectată în stea cu o fază nealimentată.....	69	
4.2.3 Figuri CEUS obținute cu un motor GROSU-CERNOMAZU.....	71	17
4.2.4 Figuri CEUS caracteristice unui motor GROSU conectat în V.....	72	
4.2.5 Figuri CEUS obținute cu un motor GROSU, cu conexiune în V cu o fază nealimentată.....	73	
4.3 Concluzii.....	74	

CAPITOLUL 5

Modelarea motorului GROSU prin metoda elementului finit.....	76	19
5.1 Considerații generale.....	76	
5.2 Modelarea motorului GROSU în Flux 2D.....	80	19
5.3 Analiza rezultatelor modelării comparativ cu figurile CEUS obținute experimental.....	82	20
5.4 Concluzii.....	88	

CAPITOLUL 6

Contribuții privind utilizarea figurilor CEUS ca soluție pentru diagnosticarea defectelor bobinajului statoric la motoarele de curent alternativ.....	89	22
6.1 Noțiuni introductive.....	89	
6.2 Stand experimental de diagnosticare cu figuri CEUS.....	92	22
6.3 Figurile CEUS obținute pentru diverse tipuri de defect.....	94	23
6.3.1 Defecte în rețeaua de alimentare.....	94	23
6.3.2 Defecte interne ale bobinajului statoric.....	95	24
6.4 Concluzii.....	99	

CAPITOLUL 7

Concluzii.....	101	25
7.1 Aspecte generale.....	101	
7.2 Contribuții teoretice.....	101	25
7.3 Contribuții practice/experimentale.....	102	25
7.4 Perspective de dezvoltare ulterioară a temei.....	104	27

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

Anexa 1 - Buletine de analiză cromatografică ale bilelor utilizate pentru încercările experimentale.....	121	
Anexa 2 - Dispozitive concepute în cadrul EMAD pentru modelarea efectului Kagan.....	127	
Anexa 3 - Detalii constructive ale dispozitivului pentru producerea câmpului magnetic învârtitor de frecvență variabilă.....	130	
Anexa 4 - Modele experimentale abordate în cadrul tehnicilor psihologice de creație.....	131	
Anexa 5 - Detalii constructive ale transformatorului de curenți tari utilizat pentru studiul profilului hidrostatic al unui ferrofluid.....	132	
Anexa 6 - Fișa de produs pentru ferrofluide Ferrotec din seria EFH.....	133	
Anexa 7 - Figuri CEUS obținute pentru diverse variante de alimentare a statorului GROSU și GROSU-CERNOMAZU.....	137	

INTRODUCERE

[19], [39], [112], [129], [183], [188], [189]

Ferrofluidele sau *lichidele magnetice* sunt acele fluide obținute prin imersarea unor particule magnetice de dimensiuni subdomenice într-un lichid de bază. Caracterul magnetic al compoziției astfel obținute este dat de particulele ultrafine dispersate în lichid care se comportă fiecare în parte similar unui magnet permanent, interacționând cu câmpurile magnetice exterioare. Datorită agitației termice moleculare și dimensiunilor foarte mici ale particulelor magnetice (aproximativ 10 nm), fluidul obținut este omogen și nu apare tendința de sedimentare. Totodată, pentru prevenirea aglomerării pulberii de material magnetic, particulele trebuie să aibă în permanență un anumit spațiu între ele, lucru posibil prin acoperirea fiecărei particule în parte cu un strat elastic de stabilizant. Ferrofluidele astfel obținute sunt materiale magnetice perfect moi ce manifestă magnetizare de saturație în prezența câmpurilor magnetice intense, dar nu au histerezis magnetic [188], [189].

Studii în domeniul lichidelor magnetice au fost inițiate la Universitatea Ștefan cel Mare din Suceava începând din anul 1996. Aici, în cadrul Centrului de Cercetare în domeniul Mașini, Aparare și Acționări Electrice (EMAD), sub conducerea domnului prof. univ. dr. ing. Dorel Cernomazu au fost definite o serie de lucrări de diplomă [88], [128], disertații, referate științifice [21], [24], [130], [131], [132], [189], teze de doctorat [19], [129], cereri de brevet de invenție [29], [35], [53], [95], [96], [124], [125], [197], [198], sau articole [18], [32], [49], [56], [188], [190] ce au ca principală temă cercetări în domeniul ferrofluidelor [129].

Având în vedere faptul că ferrofluidele sunt materiale ce îmbină într-un mod unic proprietățile magnetice ale particulelor din compoziție cu proprietățile fizice ale lichidelor de bază, este deschisă o plajă largă de posibile aplicații limitată doar de inventivitatea cercetătorului. Plecând de la această premisă, obiectivul tezei de doctorat constă în extinderea aplicațiilor bazate pe pulberi feromagnetice și ferrofluide.

Lucrarea este structurată în șapte capitole principale, o introducere, o listă cu 198 de referințe bibliografice (din care 11 prezintă contribuțiile autorului în domeniul tezei, iar alte 41 sunt lucrări publicate în domenii conexe) și șapte Anexe cu informații suplimentare și detalii referitoare la conținutul tezei.

În *primul capitol* al lucrării sunt prezentate aspecte introductiv-generale referitoare la ferrofluide precum și fenomene specifice acestor materiale. Având în vedere particularitățile lichidelor magnetice sunt descrise o serie de aplicații practice ale acestora, începând cu primele utilizări din tehnica aerospațială (motorul Pappel – 1960) și până la tehnologia de astăzi din industria auto, medicină, biologie, acustică ș.a.

A doua parte a primului capitol face o trecere în revistă a rezultatelor obținute în domeniul ferrofluidelor în cadrul Centrului de Cercetare EMAD.

Cel de-al *doilea capitol* al tezei este axat pe studiul efectelor specifice câmpului magnetic învârtitor de frecvență variabilă. În cadrul lucrării a fost abordat fenomenul de rotație a unui ferrofluid în sens invers câmpului aplicat (*efectul Kagan*). Încercările au fost bazate pe utilizarea unor pulberi de aluminiu, alamă, cupru sau folosirea unor bile (analizate cromatografic pentru stabilirea compoziției) și realizarea unui set de bile (50 % ferrofluid și 50 % parafină) care să îmbine

proprietățile magnetice cu flotabilitatea. Câmpurile magnetice aplicate acestor materiale au fost produse fie de un stator trifazat fie de o instalație compusă din doi magneți permanenți plasați diametral opus pe un suport și antrenați în mișcare de rotație de un motor de curent continuu alimentat cu tensiune variabilă. Plecând de la acest stand experimental a fost întocmită documentația necesară brevetării unui agitator electromecanic cu dublu sens.

În ultima parte a capitolului doi este prezentat un exemplu de utilizare a tehnicilor psihologice de creație în scopul găsirii unor noi variante constructive ale agitatorului electromecanic.

Al treilea capitol al lucrării prezintă contribuțiile autorului la realizarea unor dispozitive bazate pe profilul hidrostatic al unui ferrofluid. În studiul comportării ferrofluidului în jurul unui curent vertical au fost testate diverse configurații ale instalației experimentale, în final ajungându-se la realizarea unui dispozitiv de diagnosticare a coliviei rotorice la motoarele asincrone. Și pentru această soluție a fost întocmită și depusă la OSIM documentația necesară obținerii brevetului de invenție.

Capitolul patru este dedicat unui studiu comparativ între figurile CEUS obținute de dr. ing. Mihaela-Brândușa Negru, respectiv dr. ing. Corneliu Buzduga cu o dispersie de particule magnetoactive și imaginile obținute de autor cu un ferrofluid profesional. Figurile CEUS sunt de fapt un set de imagini ce captează mișcarea ferrofluidului plasat în câmp magnetic învârtitor, deplasarea acestuia fiind pusă în evidență cu ajutorul unei pulberi de bronz.

Standul experimental constituit dintr-un motor GROSU și GROSU-CERNOMAZU a fost pus sub tensiune în diverse scheme de alimentare, iar figurile CEUS captate și prezentate în acest capitol și în Anexa 7, confirmă rezultatele anterior obținute de predecesori.

Capitolul cinci al lucrării se desprinde de tipologia primelor capitole prin aceea că, dacă până la acest punct, cercetările au fost axate pe încercări experimentale, acest capitol este dedicat modelării și simulării numerice. În acest scop, rezultatele obținute în capitolul patru au fost replicate pe un software special – Flux 2D, utilizând metoda elementului finit.

Simularea pe calculator a standurilor aferente motorului GROSU și GROSU-CERNOMAZU a reliefat o evidență corelare între direcția liniilor de câmp obținute prin modelare și figurile CEUS captate experimental.

În *capitolul șase* este reluată problematica diagnosticării defectelor la motoarele asincrone, dar de această dată cercetările sunt îndreptate în direcția defectoscopiei bobinajului statoric.

Prima parte a capitolului prezintă problematica generală a regimurilor de funcționare anormală datorate defectelor în stator.

În cea de-a doua parte a capitolului este propusă o soluție de diagnosticare a motoarelor asincrone cu ajutorul ferrofluidului. În acest scop au fost captate figuri CEUS atât pentru defecte datorate problemelor în rețeaua de alimentare (funcționarea în două faze, tensiuni neechilibrate, succesiune greșită etc.) precum și pentru defecte interne ale bobinajului statoric (înfășurare întreruptă, spire în scurtcircuit, inversarea începutului cu sfârșitul înfășurării etc.).

Pe lângă încercările efectuate pentru diverse situații reale întâlnite în practică, în finalul capitolului cinci, mai sunt prezentate și rezultatele obținute pentru o serie de conexiuni speciale precum conexiunea în V, *triunghi deschis* sau *stea cu o înfășurare dezlegată și scurtcircuitată*.

Lucrarea se încheie cu un *capitol de concluzii generale* în care sunt sintetizate contribuțiile autorului (teoretice și experimentale) precum și perspectivele de dezvoltare ulterioară a tematicii abordate.

CAPITOLUL 1

STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR ÎN DOMENIUL FEROFLUIDELOR ȘI REZULTATE OBȚINUTE ÎN CADRUL USV

[19], [24], [37], [39], [78], [80], [81], [85], [87], [104],
[112], [129], [138], [141], [142], [149], [160], [169], [189]

1.1 FENOMENE SPECIFICE FEROFLUIDELOR

[24], [39], [78], [112], [132]

Asupra corpurilor scufundate în ferrofluid, în prezența unor câmpuri magnetice exterioare, se exercită forțe de plutire de natură mai complexă decât în cazul corpurilor scufundate în lichide ordinare. Pentru a descrie aceste forțe, în cele ce urmează, sunt prezentate ecuațiile caracteristice fenomenelor de levitație în ferrofluide.

Levitația în ferrofluide este diferită de levitația în câmpuri magnetice variabile, levitație care se realizează numai în cazul corpurilor bune conductoare electric aflate în astfel de câmpuri. În cazul levitației în ferrofluide, fenomen observat și tratat teoretic pentru prima dată de Rosensweig în anul 1966, corpul levitat nu este necesar să fie conductor electric, dar este necesar să fie înconjurat de un ferrofluid [112].

1.2 UTILIZĂRI ALE FEROFLUIDELOR ÎN TEHNICĂ

[19], [39], [104], [112], [160], [189]

Datorită fenomenelor specifice ferrofluidelor, domeniile de utilizare ale acestora sunt foarte variate, începând de la tehnica aerospațială, minerit, geologie, industria auto, electrotehnică și extinzându-se în ultimii ani la noi arii precum medicină, biologie, acustică, electronică, conversia energiei ș.a. [19].

Prima aplicație a ferrofluidelor a fost soluția propusă de fizicianul S. Pappel la problema alimentării cu combustibil a vehiculelor spațiale. Deoarece în mediul imponderabil combustibilul navetelor spațiale era imposibil de controlat în interiorul rezervorului, a devenit necesară identificarea unei soluții în acest sens. *Sistemul de pompare* prezentat în figura 1.4 presupune utilizarea unui carburant ferrofluidic ce are ca lichid de bază un combustibil obișnuit – heptanul. Astfel, prin amplasarea unui magnet în apropierea sorbului pompei de alimentare, combustibilul era atras către aceasta, pentru ca mai apoi să fie aspirat și direcționat către motor [189].

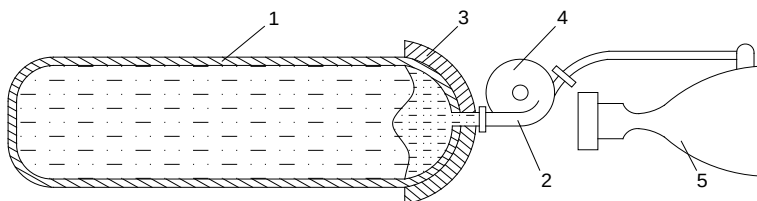


Fig. 1.4 Principiul de funcționare al motorului Pappel [112]:

1-rezervor de combustibil; 2-conductă de evacuare; 3-magnet permanent; 4-pompă; 5-ajutaj.

O altă utilizare frecvent întâlnită a lichidelor magnetice o reprezintă soluțiile de *etanșoare ferrofluidice*. Ideea a plecat de la etanșoarele centrifugale la care un fluid este acționat de forțe centrifuge pentru a fi poziționat și alipit între suprafețe mobile și statice. Ferrofluidul oferă posibilitatea înlocuirii forțelor centrifuge cu forțe magnetice, eliminând astfel dezavantajele etanșoarelor centrifugale care, la viteze mici, pot prezenta curgeri ale fluidului de lucru și scăpări în zona de etanș [39], [160].

În mod similar etanșărilor ferrofluidice, *construcția de lagăre și tehnica lubrifierii* exploatează posibilitatea poziționării optime a ferrofluidului cu ajutorul câmpurilor magnetice. Cel mai simplu model de lagăr ferrofluidic este realizat prin inserarea unui magnet permanent într-un ax nemagnetic poziționat într-o carcasă nemagnetică. Ferrofluidul este astfel reținut în interiorul lagărului cu ajutorul câmpului magnetic generat de magnetul implantat în ax [104].

Pe lângă exemplele de utilizări ale ferrofluidelor prezentate mai sus, acestea se pot regăsi într-o serie de aplicații precum: *amortizoarele cu ferrofluid*; *comutatoarele cu ferrofluid*; *supape și valve ferrofluidice*; *accelerometre*; *densitometre*; *sistemele de scriere și afișare*; *sisteme de refrigerare prin absorbție*; *convertoare termo-mecanice*; *busole cu ferrofluid*, *cromatografe*, *aspiratoare magnetice* s.a. [39], [112].

1.3 APLICAȚII CU FEROFLLUIDE CONCEPTE ÎN CADRUL CENTRULUI DE CERCETARE EMAD

[19], [37], [80], [81], [85], [87], [129], [138], [141], [142], [149], [169], [189]

Lucrarea de față are ca punct de plecare cercetările efectuate în cadrul colectivului EMAD încă din anul 1996 și reprezintă o continuare a tezelor de doctorat "*Contribuții privind extinderea aplicațiilor ferrofluidelor și a pulberilor feromagnetice în electrotehnică*" și "*Contribuții la extinderea aplicațiilor ferrofluidelor și pulberilor feromagnetice în electrotehnică*" elaborate de dr. ing. Mihaela-Brândușa Negru, respectiv dr. ing. Corneliu Buzduga sub atenta coordonare a domnului prof. univ. dr. ing. Dorel Cernomazu.

De asemenea, elemente legate de studiul ferrofluidelor și câteva modele experimentale sunt prezentate și în teza "*Aspecte teoretice și experimentale privind extinderea aplicațiilor actuatorilor electromecanice cu lichid realizate pe baza unor fenomene fizico-chimice*" finalizată în anul 2013 de dr. ing. Ilie Nițan.

Cercetările în domeniul ferrofluidelor au fost concretizate într-o serie de standuri experimentale și variante constructive transpuse în articole științifice, cereri de brevet de invenție, lucrări de diplomă, disertații și teze de doctorat în următoarele direcții:

- comportarea lichidelor magnetice sub acțiunea unui câmp magnetic învârtitor;
- diagnosticarea defectelor rotoarelor în colivie;
- realizarea unor indicatoare de sens cu ferrofluid;
- realizarea unor standuri pentru studiul stabilității ferrofluidelor în câmp magnetic, pentru evidențierea profilului hidrostatic al ferrofluidelor și pentru magnetizarea unor ferrofluide în câmpuri de joasă intensitate;
- realizarea unor micropompe cu ferrofluid.

CAPITOLUL 2

CONTRIBUȚII PRIVIND VERIFICAREA COMPORTĂRII PULBERILOR ȘI LICHIDELOR MAGNETICE SUPUSE CÂMPULUI MAGNETIC ÎNVÂRTITOR DE FRECVENȚĂ VARIABILĂ

[18], [19], [39], [112], [127], [129], [131], [135], [148], [193], [198]

2.2 STUDIUL EFECTELOR SPECIFICE CÂMPULUI MAGNETIC ÎNVÂRTITOR DE FRECVENȚĂ VARIABILĂ

[18], [19], [112], [148], [127], [129], [131], [135], [198]

Cu ocazia efectuării unor experimente asupra fenomenelor specifice câmpului magnetic învârtitor (CMÎ) de frecvență variabilă, dl. prof. dr. ing. Dorel Cernomazu observă o comportare aparte numită în continuare efect CEUS. Utilizând o dispersie de particule magnetoactive nestabilizate de OL 37 în apă și folosind un CMÎ produs de un stator bipolar de motor asincron trifazat s-a constatat tendința inițială a soluției de a se roti în același sens cu CMÎ, urmată imediat de rotația în sens contrar [129].

2.2.2 Verificarea *efectului Kagan* cu ajutorul pulberilor feromagnetice

Mișcarea de rotație a unui ferrofluid în sens invers câmpului magnetic învârtitor aplicat a fost numită în literatura de specialitate *efect Kagan*. Această mișcare, aparent ciudată, se poate explica analizând sensul de rotație al particulelor monodomenice din ferrofluid. Se observă cum fiecare particulă execută o mișcare de rotație în jurul axei proprii în sensul câmpului magnetic învârtitor. În momentul în care aceste particule, aflate în mișcarea de rotație, ajung în contact cu pereții vasului, transmit o parte din momentul lor cinetic recipientului. Din acest motiv se poate observa cum în apropierea pereților paharului apare o mișcare de rotație macroscopică în sens invers CMÎ, iar în centrul recipientului, sensul de rotație corespunde sensului CMÎ aplicat [112], [129], [131].

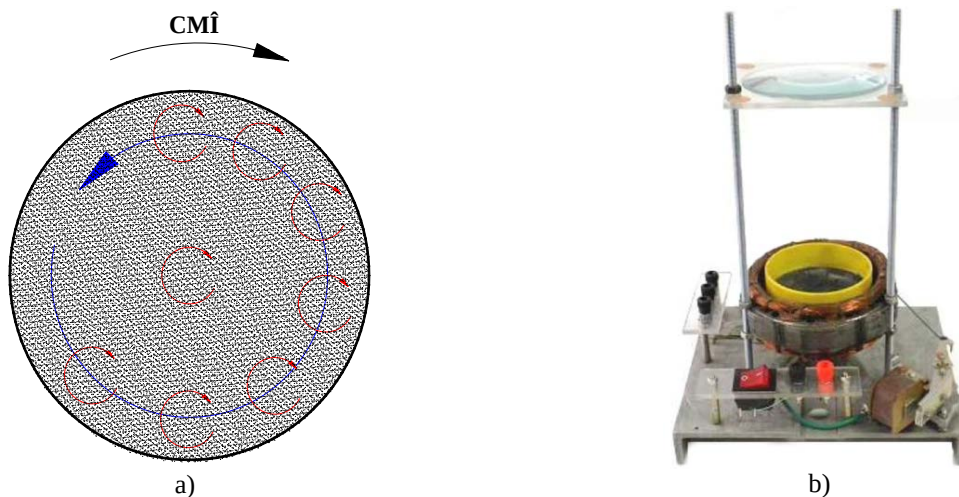


Fig. 2.6 Comportarea pulberilor magnetoactive plasate în CMÎ:
a) explicativă la formarea microvârtejurilor și sensul de rotație imprimat pulberilor la periferia recipientului; b) stand experimental utilizat.

Fenomenul de rotire al unui material în sens invers câmpului magnetic învârtitor aplicat poate fi întâlnit atât la ferofluide cât și la pulberi magnetoactive. De aceea, un pas premergător studiului CMÎ de frecvență variabilă, a fost observarea comportării unor pulberi plasate în câmp magnetic. Pentru aceasta s-a folosit un stand experimental compus dintr-un sator trifazat al cărui rotor a fost înlocuit de un recipient cu pulberi de aluminiu, cupru sau alamă. La alimentarea satorului în succesiune directă (R-S-T), în pulbere apar microvârtejuri ce se rotesc în jurul axei proprii în același sens cu câmpul magnetic (la dreapta). În același timp, la extremitatea paharului apare o mișcare mai amplă a pulberii, în sens invers câmpului magnetic aplicat (la stânga), așa cum este exemplificat în figura 2.6 a).

Pentru evidențierea efectului de perete s-a utilizat o bilă din aluminiu, plasată în recipient peste pulberea de cupru analizată (fig. 2.7 c)). În timp ce microvârtejurile din pulbere urmează sensul CMÎ, bila se rotește în jurul axei proprii în sensul CMÎ, dar parcurge un traseu circular, la periferia recipientului în sens invers câmpului aplicat.

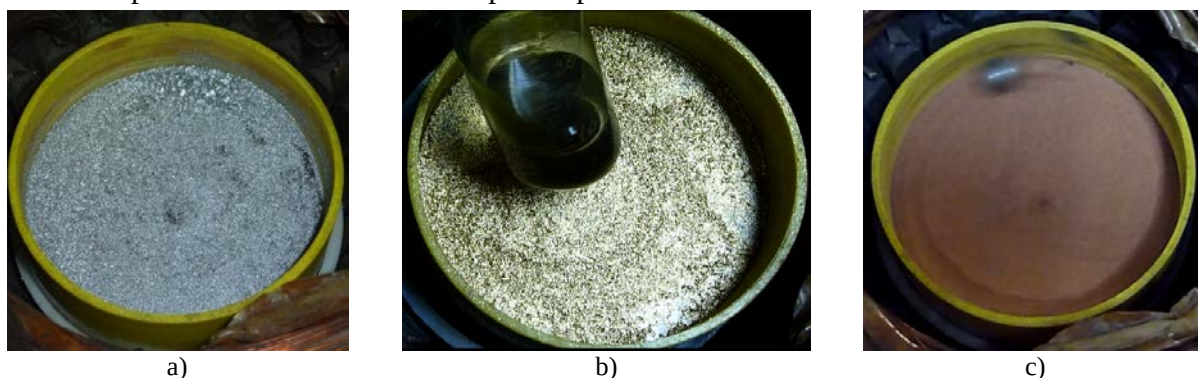


Fig. 2.7 Verificarea *efectului Kagan* pentru pulberi:
a) aluminiu; b) alamă și indicator de sens; c) cupru și bilă de aluminiu.

Aceste efecte de vârtej și de perete, mai sus descrise, au fost transpuse într-o serie de dispozitive experimentale, realizate și testate în cadrul Centrului de Cercetare EMAD, parte din ele fiind pe scurt prezentate în Anexa 2 (fig. A.2.1, fig. A.2.2 și fig. A.2.3).

2.2.3 Studii privind câmpul magnetic învârtitor de frecvență variabilă

Continuând cercetările în această direcție și extrapolând prin aplicarea efectelor descrise la alte tipuri de materiale, în cadrul contribuțiilor prezentate în această lucrare s-a studiat comportarea unor bile feromagnetice supuse CMÎ progresiv de frecvență variabilă. Pentru aceasta s-a realizat un stand compus dintr-un vas dielectric plasat în interiorul câmpului magnetic produs de doi magneți permanenți antrenați în mișcare de rotație de un motor de curent continuu.

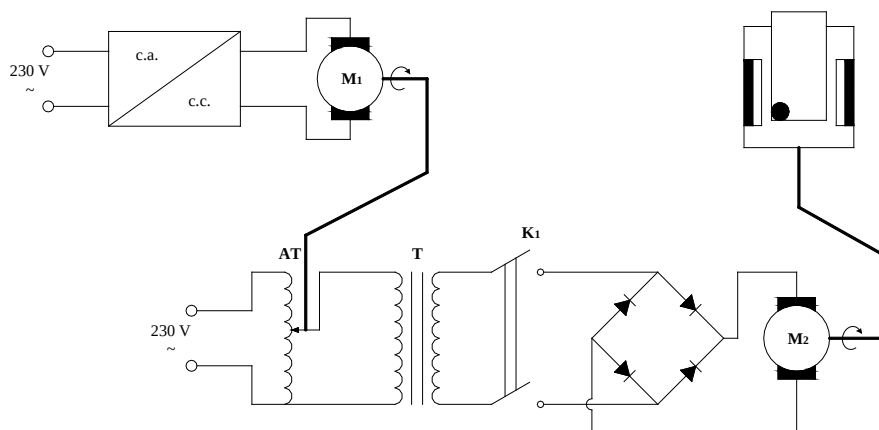


Fig. 2.9 Schema electrică de alimentare a standului experimental.

Schema electrică a standului este compusă dintr-un autotransformator AT, care, prin intermediul unui transformator de separație T și a unui comutator K_1 , alimentează motorul M_2 . Transformatorul de separație este un transformator coborâtor ce are rolul de a asigura o mai bună sensibilitate și precizie la reglajul tensiunii preluate de pe înfășurarea secundară a AT. Totodată, pentru a asigura o viteză constantă de creștere/scădere a tensiunii furnizate de AT, cursorul acestuia este acționat de un motor de curent continuu M_1 , alimentat de la o sursă separată.

În cadrul încercărilor experimentale, au fost efectuate câte trei seturi de măsurători pentru cinci tensiuni diferite de alimentare a motorului M_1 , identificându-se astfel patru puncte critice ale vitezei câmpului magnetic învârtitor: v_1 ; v_2 ; v_3 ; v_4 .

Pentru a ilustra comportarea bilei feromagnetice în timp la creșterea turației, se trasează graficul din figura 2.10 pentru tensiunea de alimentare a motorului M_1 de 14 volți.

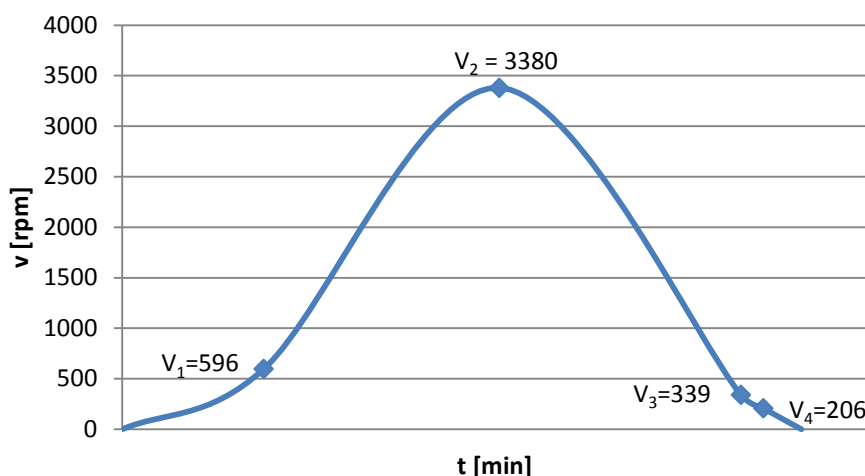


Fig. 2.10 Viteza de rotație a câmpului magnetic învârtitor în timp.

Analizând graficul de mai sus, se observă pe curbă cinci zone în care bila feromagnetică are diverse comportări:

La creșterea turației

$0 - v_1$ bila feromagnetică se rotește în sens orar (la dreapta), iar când se atinge viteza de 595 rpm își schimbă brusc sensul de rotație la stânga;

$v_1 - v_2$ bila continuă să se rotească la stânga până la turația maximă de 3380 rpm;

La scăderea turației

$v_2 - v_3$ se păstrează sensul de rotație la stânga până la viteza de 339 rpm;

$v_3 - v_4$ în acest interval, bila feromagnetică rămâne în echilibru;

$v_4 - 0$ la viteza de 206 rpm are loc a doua inversare de sens și bila capătă o mișcare de rotație la dreapta, sens de deplasare păstrat până la viteza 0 a CMÎ.

2.2.4 Agitator electromecanic cu acțiune dublă

Plecând de la fenomenul observat în experimentele anterioare și având ca bază cererea de brevet [135], în cadrul laboratorului a fost conceput, realizat și testat un model experimental de agitator electromecanic cu dublu sens. Acesta utilizează efectul de reversare al bilei funcție de poziția relativă a acesteia în interiorul câmpului magnetic învârtitor. Modelul testat este constituit din două sisteme de agitare realizate cu ajutorul unor bile feromagnetice de diametre diferite. Cele două bile sunt supuse acțiunii aceluiași câmp magnetic învârtitor dar, la o anumită frecvență, una din ele își schimbă sensul de rotație. În acest fel se obține o mișcare simultană a bilelor pe trasee diferite și cu senzori de deplasare contrare. Dispozitivul experimental, este prezentat în figura 2.11.

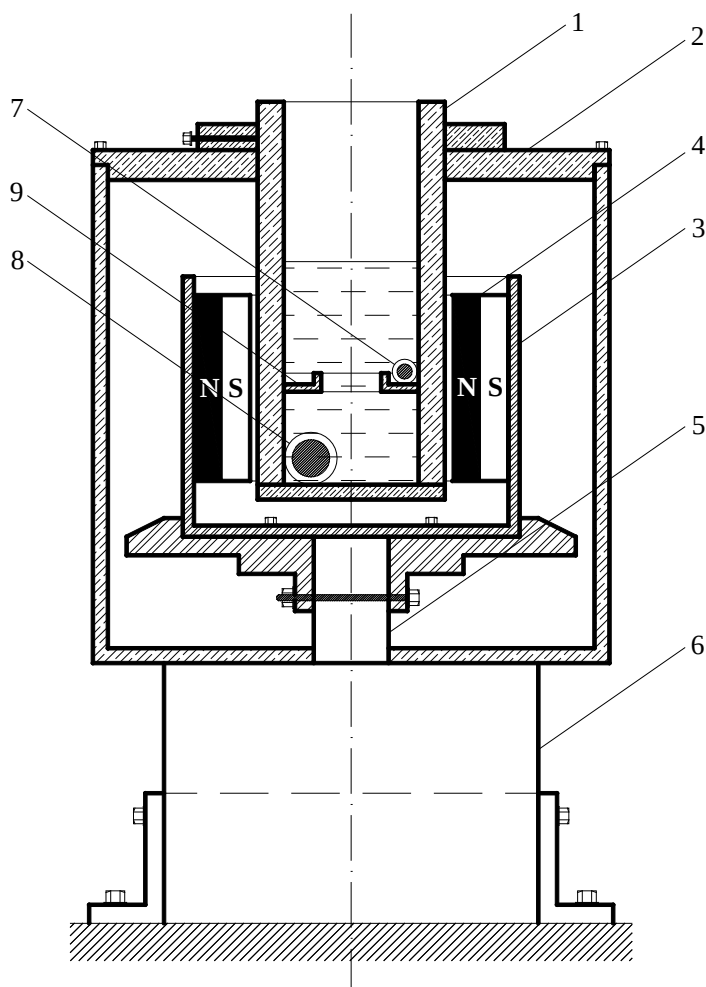


Fig. 2.11 Agitator electromecanic cu acțiune dublă [198]:

1 – recipient cilindric electroizolant; 2 – suport electroizolant; 3 – vas feromagnetic suport pentru magneți; 4 – magneți permanenți; 5 – ax de antrenare; 6 – motor; 7,8 – bile feromagnetice; 9 – jgheab inelar.

Agitatorul electromecanic cu acțiune dublă este compus dintr-un vas electroizolant 1, fixat într-un suport electroizolant 2 și plasat în câmpul magnetic creat de doi magneți permanenți 4. În interiorul suportului 2 este montat un ansamblu rotativ feromagnetic sub formă de pahar 3, pe care sunt dispuși, în poziții diametral opuse, cei doi magneți permanenți. Ansamblul rotativ este antrenat în mișcare de rotație de un motor de curent continuu 6, prin intermediul unui ax 5. Reglarea tensiunii de alimentare a motorului 6 se face cu ajutorul unui autotransformator cu contact alunecător. În interiorul vasului electroizolant 1 sunt introduse două bile feromagnetice 7 și 8 de dimensiuni diferite. Una din bile este plasată pe fundul recipientului, iar cealaltă pe un jgheab inelar 9, din material electroizolant, lipit pe partea interioară a vasului 1, sub nivelul fluidului.

Bilele feromagnetice 7 și 8, de dimensiuni diferite, plasate în zone diferite ale aceluiași câmp magnetic învârtitor de frecvență variabilă, se deplasează în interiorul vasului cu fluid dielectric una în sens orar, iar cealaltă în sens antiorar. Direcția de deplasare a bilelor este dată de poziția relativă în interiorul câmpului magnetic și frecvența critică la care se produce ruperea cuplului magnetic sincron pentru una din bile [198].

2.2.5 Utilizarea tehnicilor psihologice de creație în scopul realizării unor noi variante constructive ale agitatorului electromecanic

În scopul verificării fenomenului observat și pentru identificarea unor aplicații industriale ale modelului experimental, au fost efectuate încercări pentru diverse medii precum: bile imersate în apă, alcool tehnic, ulei de transformator sau glicerină. Totodată au fost proiectate diverse soluții pentru îmbunătățirea standului experimental prin folosirea tehnicilor psihologice de creație.

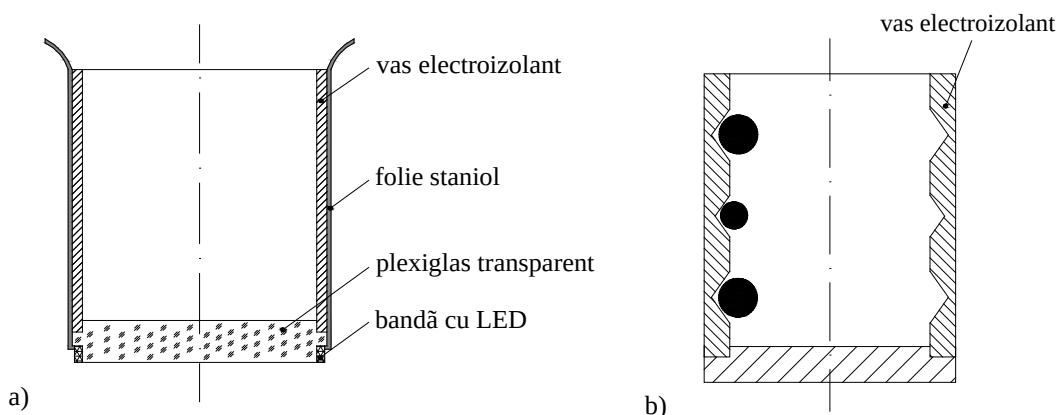


Fig. 2.13 Îmbunătățiri și variante experimentale propuse:
a) iluminare vas electroizolant; b) bile ce se rotesc în canale realizate pe pereții vasului.

Tabelul 2.3 Iluminarea vasului electroizolant

	Tehnici psihologice aplicate	Întrebări definitorii pentru tehnicile psihologice folosite	Întrebări specifice domeniului tehnic abordat
1.	Analogia și extrapolarea	”...cu ce se aseamănă?...” ”...dacă este vre-un precedent?...” ”...există ceva similar?...” ”...de unde se poate extrapola vre-o soluție?...”	”...este invocată analogia cu standul pentru studiul stabilității ferrofluidelor în câmp magnetic (fig. 1.12)...” ”...este invocată analogia cu instalația pentru evidențierea profilului hidrostatic al ferrofluidului (fig. 1.13)”
2.	Combinarea	”...ce idei s-ar putea combina?...”	”...dacă fundul recipientului electroizolant ar fi realizat dintr-un material transparent (plexiglas) și s-ar amplasa în apropiere o sursă de lumină?...”
3.	Modificarea – ameliorarea – dezvoltarea	”...ce i se poate adăuga?...”	”...dacă s-ar adăuga o bandă cu LED-uri pentru iluminarea vasului electroizolant?...”

Tabelul 2.4 Trei bile poziționate pe canale verticale decupate în interiorul vasului electroizolant

	Tehnici psihologice aplicate	Întrebări definitorii pentru tehnicile psihologice folosite	Întrebări specifice domeniului tehnic abordat
1.	Analogia și extrapolarea	”...cu ce se aseamănă?...” ”...dacă este vre-un precedent?...” ”...există ceva similar?...”	”...este invocată analogia cu modul de poziționare al bilelor în interiorul cămășii unui rulment...”
2.	Combinarea	”...ce mișcări s-ar putea combina?...”	”...dacă agitarea fluidului s-ar obține prin mișcarea de rotație a trei bile diferite ce se deplasează în sensuri contrare, în trei plane paralele distincte?...”
3.	Modificarea – ameliorarea – dezvoltarea	”...ce i se poate adăuga?...”	”...dacă s-ar utiliza trei bile în loc de două?...”
		”...pentru care elemente se poate modifica forma sau dimensiunile?...”	”...dacă bilele ar fi de dimensiuni diferite?...”
		”...ce se poate înlocui și prin ce?...”	”...dacă jgheburile inelare pe care sunt plasate bilele ar fi înlocuite cu trei canale decupate în corpul vasului electroizolant?...”

CAPITOLUL 3

CONTRIBUȚII LA REALIZAREA UNOR APLICAȚII BAZATE PE PROFILUL HIDROSTATIC AL FEROFUIDULUI ÎN JURUL UNUI CURENT VERTICAL

[19], [20], [21], [75], [112], [129], [137], [140], [174], [193], [197]

3.2 STUDIUL PROFILULUI HIDROSTATIC AL UNUI FEROFUID

[20], [21], [193]

Pentru studiul comportării ferrofluidelor plasate în vecinătatea unui conductor liniar parcurs de curent, a fost realizat un stand experimental (fig. 3.6) constituit, în principal, dintr-un vas cilindric din material plastic umplut parțial cu ferrofluid. În interiorul vasului este amplasat un conductor liniar, montat în poziție verticală față de fundul vasului pe care îl străbate. Pentru a preveni scurgerile de ferrofluid, porțiunea de conductor ce trece prin fundul vasului este lipită de acesta cu un adeziv rezistent la temperaturi ridicate. Capetele conductorului analizat sunt conectate la bornele unei surse de curenți tari prin intermediul unor cabluri electrice din cupru de secțiune mare. Înălțimea coloanei de ferrofluid obținută la diverse valori ale curentului aplicat a fost măsurată cu ajutorul unei rigle gradate amplasate pe lateralul conductorului analizat [20], [21].

În timpul probelor a fost observat următorul fenomen: pentru timpi mai mari de alimentare a standului (5 - 10 secunde), electrodul (conductorul liniar supus încercărilor) se încălzea, ceea ce ducea la creșterea rezistenței circuitului. Acest fenomen se reflectă în scăderea valorii curentului ce parcurge circuitul (deși inițial curentul era setat la o valoare mai mare) și, implicit, scăderea înălțimii coloanei de ferrofluid. Din acest motiv, primele seturi de date conțineau multe erori iar graficele obținute aveau o alură neliniară, ceea ce a condus la necesitatea refacerii măsurătorilor.

Perturbațiile datorate încălzirii circuitului principal de curent au fost eliminate prin utilizarea unei camere foto ce era declanșată imediat ce curentul atinge valoarea setată. Pe fotografiile astfel obținute se putea citi ulterior înălțimea coloanei de ferrofluid. În plus, pentru asigurarea unor condiții similare la fiecare încercare, s-a impus necesitatea efectuării unor pauze între măsurători astfel încât temperatura circuitului să fie aceeași (temperatura mediului ambiant) pentru fiecare probă [193].

Imaginile captate pentru citirea înălțimii coloanei de ferrofluid sunt prezentate în figura 3.8.

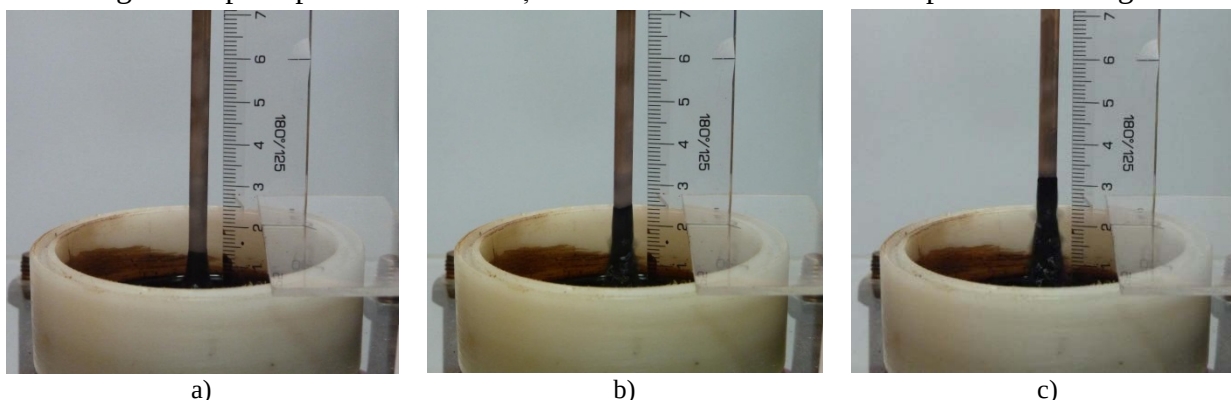


Fig. 3.8 Coloana de ferrofluid obținută pentru diverse valori ale curentului prin electrod:

a) 260 A, 14 mm; b) 340 A, 25 mm; c) 400 A, 32 mm.

În cazul unui electrod cu profil cilindric din oțel de secțiune 78,5 mm², s-a obținut:

Setul II de măsurători		
Nr. crt.	Curent [A]	h ferrofluid [mm]
1.	140	3
2.	180	3,5
3.	220	4,5
4.	260	5,5
5.	300	6,5
6.	340	7,5
7.	380	8,5
8.	420	10
9.	460	11
10.	500	12
11.	540	14
12.	580	16

Tabelul 3.5

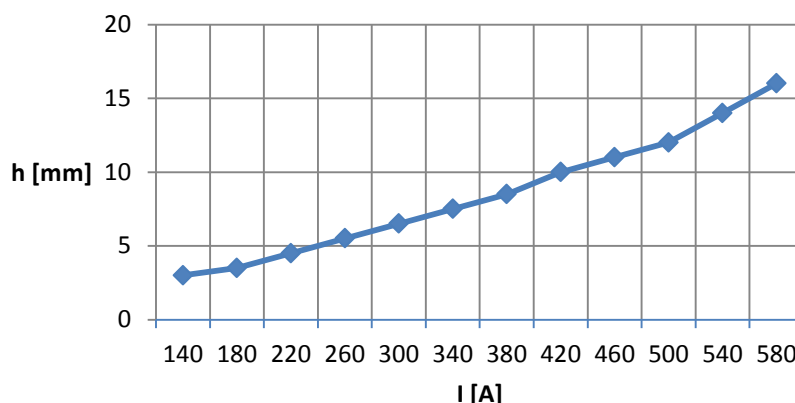


Fig. 3.9 Înălțimea coloanei de ferrofluid funcție de valoarea curentului

3.3.3 Contribuții la realizarea unui dispozitiv de diagnosticare a coliviei rotore cu ajutorul ferrofluidului

Datorită faptului că funcționarea mașinilor electrice asincrone cu rotor dezechilibrat generează importante probleme în exploatare, multe din preocupările în acest domeniu au fost canalizate către găsirea unor soluții nedistructive de diagnosticare a rotoarelor în colivie. În acest scop, colectivul de cercetători format din NEGRU, M. B.; CREȚU, N.; CERNOMAZU, D. et. al. depun la OSIM documentația necesară obținerii brevetului de invenție pentru *Metodă privind defectoscopia rotoarelor în colivie*.

Soluția mai sus amintită se bazează pe utilizarea unui detector de flux magnetic realizat dintr-o folie dublă, flexibilă ce conține particule de nichel dispersate într-o masă gelatinoasă. Metoda presupune conectarea inelelor de scurtcircuitare ale rotorului încercat la bornele unui transformator coborât cu o tensiune de 1,5 ÷ 2,5 V. Prin reglarea tensiunii de alimentare, în înfășurarea secundară se obține un curent de 300 ÷ 500 A. La trecerea acestui curent de valoare mare prin colivia rotorică, se creează în jurul fiecărei bare un câmp magnetic. În momentul în care rotorul, înfășurat în folia detectoare de flux, este parcurs de curent, pe suprafața foliei apar o serie de urme care diferă între ele prin contrast și lățime. Aceste urme reprezintă criterii defectoscopice prin care pot fi diagnosticate erorile de turnare precum îngustarea, fisurarea sau chiar de întreruperea barelor coliviei [137], [140].

Plecând de la metoda bazată pe indicatorul de flux magnetic, a fost concepută și dezvoltată o instalație cu ferrofluid destinată defectoscopiei coliviei rotore. Principiul de bază constă în utilizarea unui recipient circular cu ferrofluid, plasat în jurul rotorului investigat, aflat în poziție verticală. Pe traseul barelor rotore, conectate prin intermediul inelelor de scurtcircuitare la secundarul transformatorului coborât de tensiune, se formează niște dungi de ferrofluid având o înălțime dependentă de valoarea curentului asociat. În modul descris, pe direcția barelor afectate prin îngustare sau fisurare, coloanele de ferrofluid vor avea o înălțime mai mică în comparație cu înălțimea aferentă barelor fără defect [197].

Instalația pentru defectoscopia coliviei rotore prezentată în figura 3.13 este constituită, în principal, dintr-o suprafață de sprijin orizontală 1, pe care este plasat un dispozitiv de fixare 2, în care este introdus capătul liber al unui rotor cu înfășurarea în colivie 3, supus analizei diagnostice.

Pe suprafața cilindrică exterioară a rotorului este fixată o placă 4, realizată dintr-un material electroizolant prevăzută cu un canal circular "c", aflat în contact cu suprafața rotorului. În canalul "c" este depusă o cantitate de ferrofluid 5. Placa 4 este fixată prin intermediul unor tiranți 6, 6', 6'' și 6''' și este etanșată în raport cu rotorul 3 prin intermediul unei pelicule de lac adeziv 7. Colivia rotorică este conectată la o sursă de curenți tari (o trusă de curent 8) prin intermediul unor conexiuni flexibile fixate pe inelele de scurtcircuitare ale coliviei cu ajutorul unor bride de strângere cu șurub reglabil. Curentul furnizat de trusa de curent 8 este măsurat prin intermediul unui transformator de curent 9 asociat cu un ampermetru 10. Trusa de curent este alimentată de la o sursă de curent alternativ prin intermediul unui autotransformator reglabil 11, tensiunea și curentul fiind controlate prin intermediul unor aparate de măsură 12, 13, 14. Pentru verificarea planeității instalației este folosită o nivelă 15 [197].

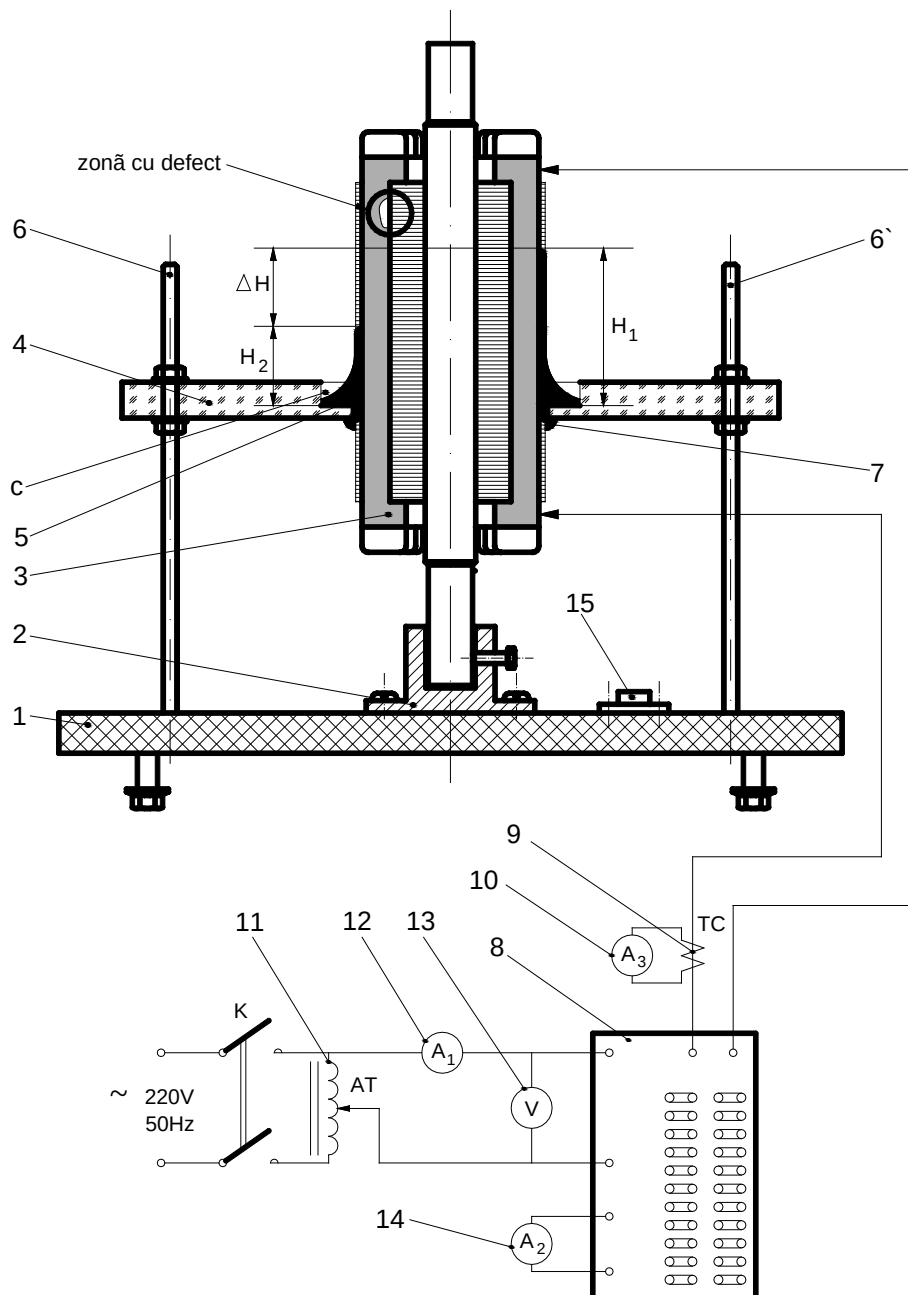


Fig. 3.13 Instalație pentru defectoscopia coliviei rotorice – secțiune longitudinală [197].

În figura 3.13 este analizat cazul în care una din barele coliviei rotorice este afectată de o îngustare. Îngustarea are ca efect creșterea rezistenței ohmice a traseului conductor și drept urmare o diminuare a curentului care traversează bara. În consecință, înălțimea coloanei de ferrofluid, H_1 , asociată barei cu defect va fi mai mică decât înălțimea coloanei de ferrofluid, H_2 asociată unei bare normale. Existența diferenței ΔH , dintre înălțimile coloanelor de ferrofluid aferente celor două bare analizate, indică existența unei îngustări sau a unei fisuri în bara cu defect. Cu cât diferența ΔH este mai mare, cu atât îngustarea barei este mai pronunțată [197].

În figura 3.14 a) este prezentat modelul experimental al standului pentru defectoscopia coliviei rotorice, iar în figura 3.14 b), c), d) sunt surprinse trei detalii ale rotorului supus încercărilor. Așa cum se observă din imagini, pentru evidențierea înălțimii ferrofluidului de pe suprafața rotorului, partea superioară a acestuia (deasupra canalului cu ferrofluid) a fost vopsită în alb. De asemenea, în scopul asigurării unei distribuții uniforme a potențialului pe toată circumferința rotorului au fost utilizate două inele de egalizare. Aceste inele, realizate din cupru, au fost conectate la cablul principal prin patru conductoare poziționate simetric pe suprafața rotorului încercat. Pentru asigurarea presiunii de contact dintre inelele de egalizare și rotor au fost montate două coliere metalice cu strângere prin șurub.



Fig. 3.14 Instalație pentru defectoscopia coliviei rotorice: a) model experimental;
b) detaliu rotor fără defect; c) rotor cu defect simulat diagnosticat cu instalația cu ferrofluid;
d) rotor cu defect simulat diagnosticat prin metoda cu indicator de flux magnetic.

CAPITOLUL 4

STUDIU COMPARATIV PRIVIND VERIFICAREA FIGURILOR CEUS OBȚINUTE CU O SUSPENSIE DE PARTICULE FEROMAGNETICE FAȚĂ DE UN FEROFUID PROFESIONAL

[6], [19], [45], [80], [81], [82], [83], [84], [102], [107], [129], [140], [153], [155], [169], [182]

4.2 CONTRIBUȚII PRIVIND OBȚINEREA FIGURILOR CEUS CU AJUTORUL UNUI FEROFUID

[19], [102], [129], [153], [182]

Figurile CEUS sunt de fapt o serie de imagini ce surprind spectrul mișcării unui ferrofluid aflat sub acțiunea câmpului magnetic învârtitor. Funcție de forma liniilor de câmp, ferrofluidul, aflat în interiorul unui vas dielectric cilindric capătă o mișcare de rotație, această deplasare fiind evidențiată cu ajutorul unei pulberi de bronz presărată pe suprafața acestuia. Aceste imagini au fost denumite ”*figuri CEUS*” (Catedra de Electrotehnică a Universității din Suceava), acronimul fiind sugerat de academicianul Emanuel Diaconescu în cadrul unei sesiuni științifice.

Continuând cercetările demarate de Brândușa Negru și Corneliu Buzduga, sub îndrumarea domnului profesor dr. ing. Dorel Cernomazu, studiul prezentat în acest capitol are ca scop confirmarea rezultatelor prezentate în lucrările [19] și [129]. În tezele amintite, figurile CEUS au fost captate folosind o suspensie de particule magnetoactive obținută pe cale electrochimică, în timp ce în lucrarea de față s-a utilizat un ferrofluid profesional de tip EFH1 cu următoarele proprietăți:

Tabelul 4.1

	Sistem Gaussian (CGS)	Sistem Internațional (SI)
Aspect: fluid de culoare neagră		
Lichid de bază: hidrocarburi ușoare		
Saturația de magnetizare	440 Gauss	44 mT
Vâscozitatea la 27 °C	6 cP	6 mPa·s
Densitatea la 25 °C	1,21 g/cc	$1,21 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$
Punctul de îngheț	- 94 °C	- 94 °C
Punctul de aprindere	92 °C	92 °C
Susceptibilitatea magnetică inițială	0,21	2,64

4.2.1 Figuri CEUS obținute cu un motor GROSU cu înfășurare trifazată conectată în *stea*

Figurile CEUS captate în cazul unui stator GROSU evidențiază dependența mișcării ferrofluidului de succesiunea fazelor și relevă existența unei zone active, apropiată de stator, unde se observă influența câmpului magnetic progresiv creat de cele trei înfășurări. În cazul succesiunii directe (R-S-T), polul mișcării, situat în zona activă, este poziționat între coloanele A și B, iar în cazul succesiunii inverse (T-S-R), polul mișcării este plasat între coloanele B și C, conform figuri 4.9 a) și d) [129].

În imaginile surprinse se observă traseele de formă circulară în zona centrală și eliptică la extremități, dispuse concentric, pe o dreaptă ce trece prin polul mișcării și mijlocul zonei active considerate. Așa cum se observă în figura 4.9, axa trasată prezintă o înclinație la dreapta atunci când CMÎ se rotește spre stânga și axa se înclină la stânga la aplicarea CMÎ cu rotație dreapta.

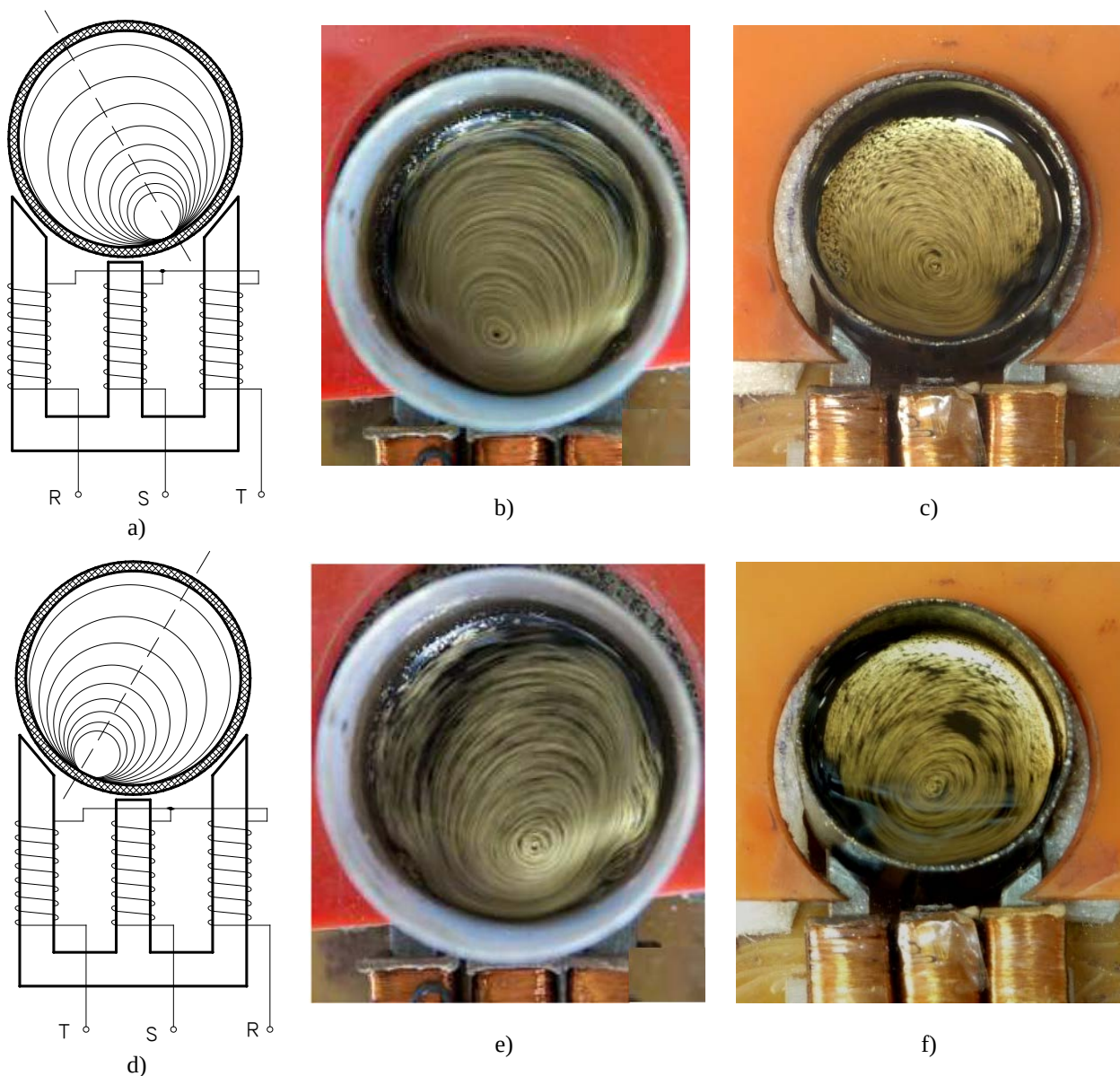


Fig. 4.9 Figuri CEUS obținute pentru un motor GROSU conectat în *stea*:
a), d) tabloul mișcării fluidului pentru succesiunea directă și inversă (R-S-T și T-S-R);
b), e) figuri CEUS obținute pentru o suspensie de particule magnetoactive [129];
c), f) figuri CEUS obținute cu ferrofluid EFH1.

4.2.3 Figuri CEUS obținute cu un motor GROSU-CERNOMAZU

Așa cum a fost prezentat și în partea introductivă a capitolului, varianta GROSU-CERNOMAZU este caracterizată prin faptul că doar una dintre bobine este alimentată de la o sursă de tensiune monofazăată, în timp ce celelalte două înfășurări (realizate cu același număr de spire ca și înfășurarea principală) sunt conectate în scurtcircuit. Sensul câmpului magnetic astfel obținut va fi dependent de modul de alimentare al motorului, adică poziția înfășurării principale în raport cu bobinele ecranate.

Figurile CEUS pentru această conexiune particulară surprind o mișcare eliptică a ferrofluidului, geometric ușor deformată, cu axa mare orientată pe direcția extremităților polilor ecranati așa cum se poate observa din figura 4.11 a) și d). Vârful S_1 al elipsei este plasat întotdeauna în zona dintre polul principal și primul pol ecranat, iar focarul principal F_1 al elipsei echivalente coincide cu polul mișcării. Totodată, se constată faptul că imaginile captate pentru această variantă reprezintă doar o fracțiune din suprafața fluidului deplasată în cazul motorului GROSU cu conexiune în *stea* [129].

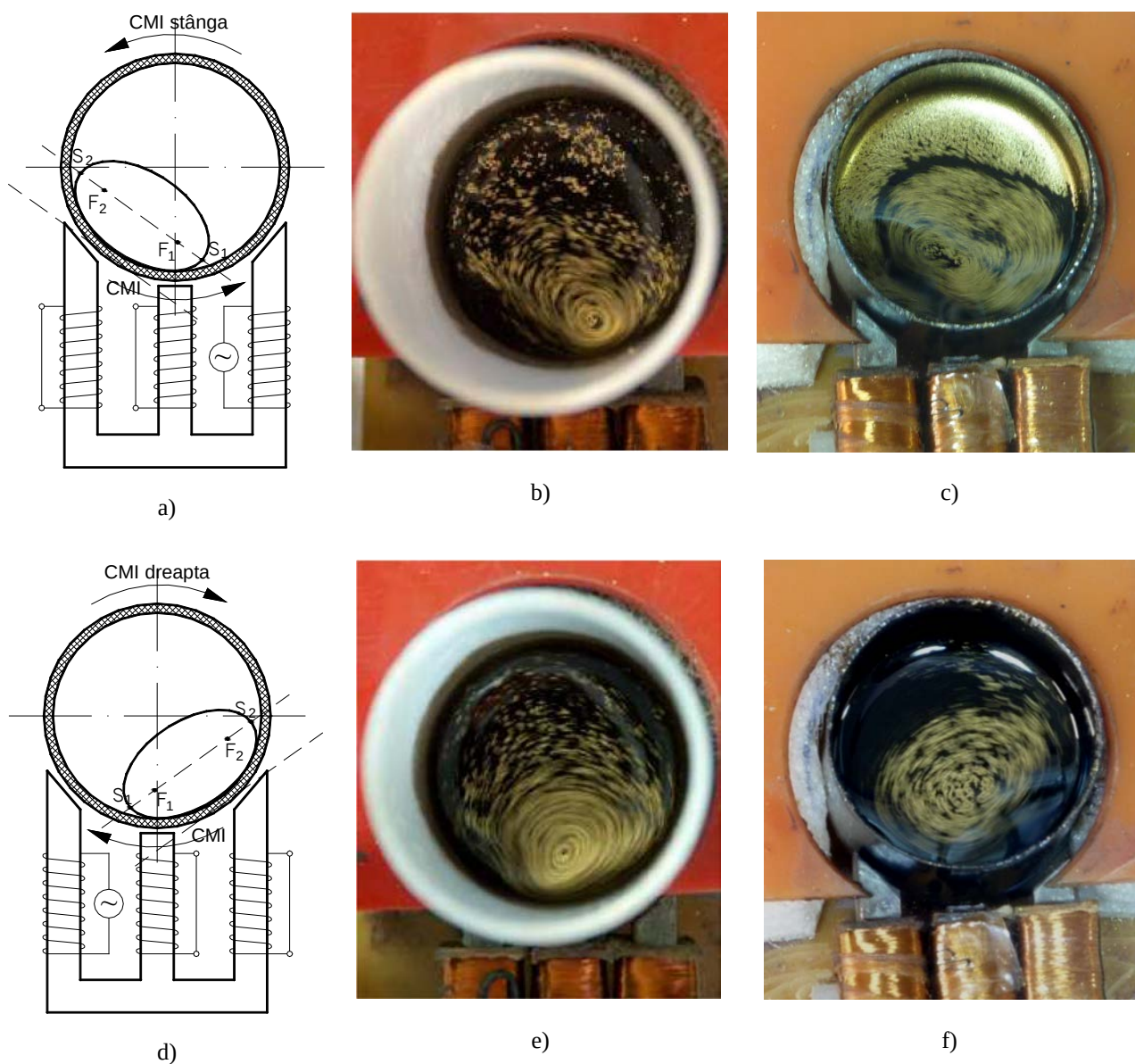


Fig. 4.11 Figuri CEUS obținute pentru un motor GROSU-CERNOMAZU:
a), d) tabloul mișcării fluidului pentru sens de rotație la stânga și la dreapta;
b), e) figuri CEUS obținute pentru o suspensie de particule magnetoactive [129];
c), f) figuri CEUS obținute cu ferrofluid EFH1.

CAPITOLUL 5

MODELAREA MOTORULUI GROSU PRIN METODA ELEMENTULUI FINIT

[114], [117], [150], [151], [171], [177], [178], [196]

5.2 MODELAREA MOTORULUI GROSU ÎN FLUX 2D

[177], [178]

În studiul problemelor de câmp magnetic, unul din programele folosite este Flux 2D/3D produs de compania Cedrat. Acest software a fost utilizat și în cazul de față în scopul corelării figurilor CEUS obținute pentru un stator GROSU, prezentat în capitolul 4 al lucrării, cu distribuția liniilor de câmp generate de modelul numeric al standului experimental.

Analiza prin metoda elementului finit presupune parcurgerea unor etape, prima din ele fiind realizarea modelului geometric prin introducerea coordonatelor punctelor de referință și apoi unirea acestora cu linii. Pe contururile astfel obținute se definesc fețele și proprietățile materialelor considerate, după care se generează rețeaua de discretizare care împarte fiecare suprafață în mici zone distincte.

Așa cum se observă în figura 5.2 c), modelul creat cuprinde mai multe regiuni cu proprietăți distincte:

- cu alb este reprezentat mediul în care este plasat standul - aer,
- culoarea albastru închis caracterizează miezul magnetic cu trei coloane,
- culoarea roșie a fost utilizată pentru bobinele cu înfășurări de cupru,
- galbenul a fost utilizat pentru recipientul electroizolant din polietilenă,
- cu albastru deschis este definit ferrofluidul.

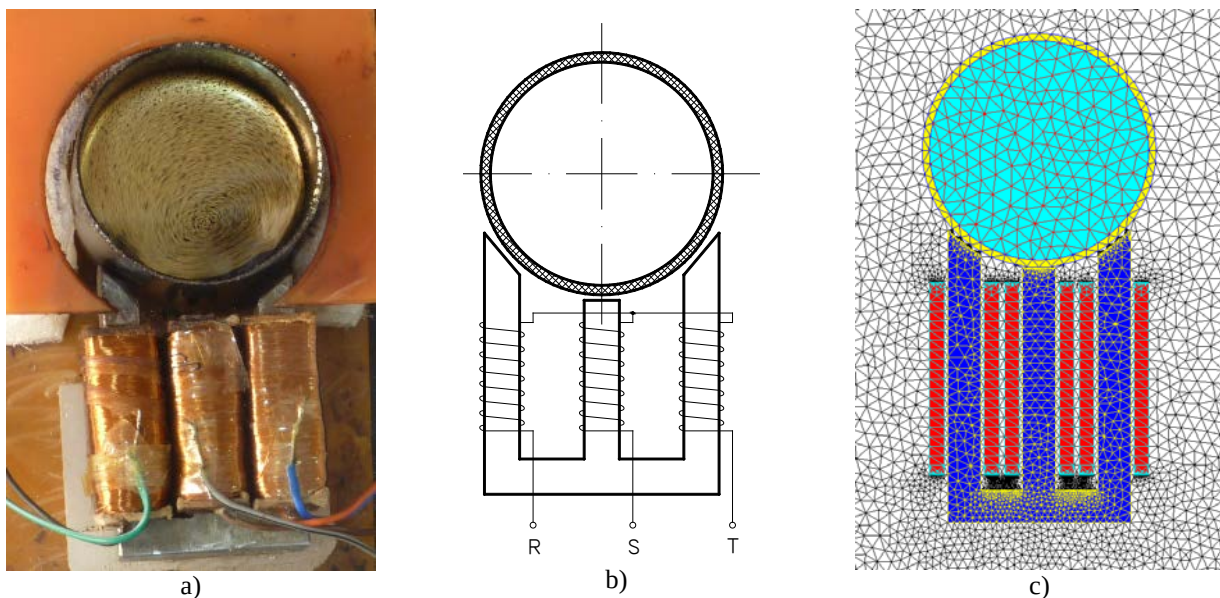


Fig. 5.2 Detalii constructive ale motorului Grosu utilizat:

a) model experimental; b) schema electrică; c) geometria standului construită în Flux.

După construirea modelului geometric, următoarea etapă este realizarea circuitului electric, respectiv conectarea celor trei bobine și alimentarea montajului la o sursă de tensiune. În cazul de față, programul Flux a fost utilizat în modul magnetostatic, ceea ce presupune considerarea unui curent de valoare constantă în timp. Una dintre problemele întâmpinate a fost dată de faptul că, modul magnetostatic al programului nu permite realizarea conexiunilor electrice la fel ca în schema reală de funcționare și de aceea pentru modelarea conexiunii stea a trebuit să se renunțe la una din cele trei surse tensiune, astfel fiind posibilă impunerea unei valori corecte a curentului în circuit.

5.3 ANALIZA REZULTATELOR MODELĂRII COMPARATIV CU FIGURILE CEUS OBTINUTE EXPERIMENTAL

Primele seturi de rezultate obținute în Flux au fost generate pentru motorul GROSU alimentat de la o sursă trifazată de tensiune atât în succesiune directă cât și inversă. Așa cum se poate observa din figura 5.4 b), pentru succesiunea R-S-T s-a obținut experimental o rotație a ferofluidului către dreapta. Pe modelul geometric simulat (fig. 5.4 c)), liniile de câmp magnetic se închid între coloanele extreme, iar vectorii sunt orientați către dreapta, ceea ce justifică modelul și sensul de rotație al figurilor CEUS obținute experimental.

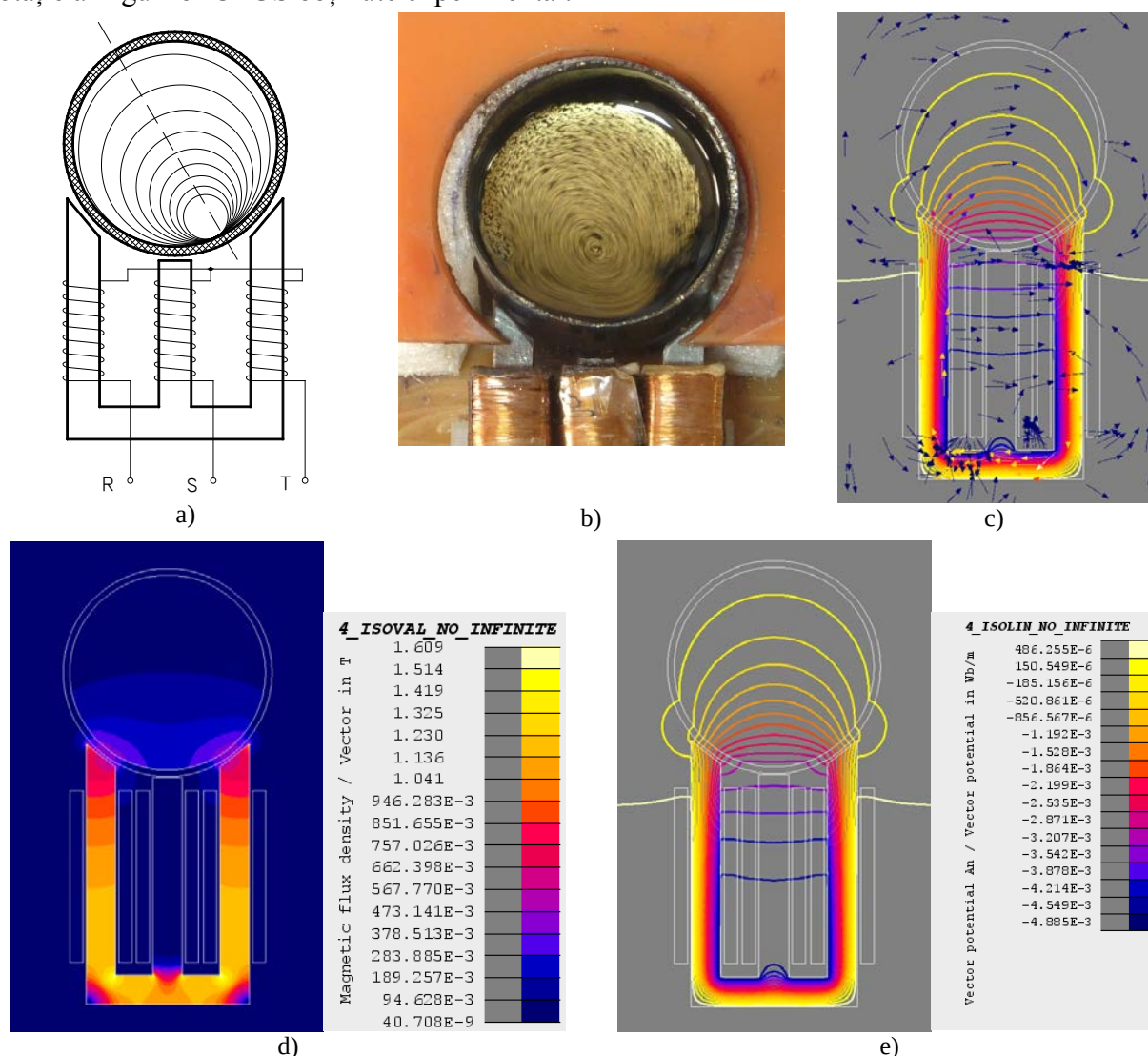


Fig. 5.4 Simularea motorului GROSU pentru conexiunea stea în succesiune directă (R-S-T):

a) schema de alimentare; b) figuri CEUS obținute pe cale experimentală cu ferofluid; c) direcția liniilor de câmp magnetic; d) harta spectrală a inducției în miezul magnetic; e) distribuția liniilor de câmp magnetic.

Un alt caz supus analizei prin metoda elementului finit a fost reprezentat de motorul GROSU alimentat în conexiune V, cu o fază întreruptă.

În figura 5.9 se observă că, în cazul întreruperii fazei S, plasată pe coloana centrală, figurile CEUS descriu două sfere, de dimensiuni aproximativ egale, orientate vertical (fig. 5.9 a) și b)). Liniile de câmp magnetic obținute prin modelare se închid între extremitățile miezului și coloana centrală în mod simetric. În ceea ce privește inducția magnetică (fig. 5.9 d)), se constată o distribuție neuniformă a acesteia, cu o concentrație mai mare pe coloana centrală a miezului magnetic și mai redusă la extremități.

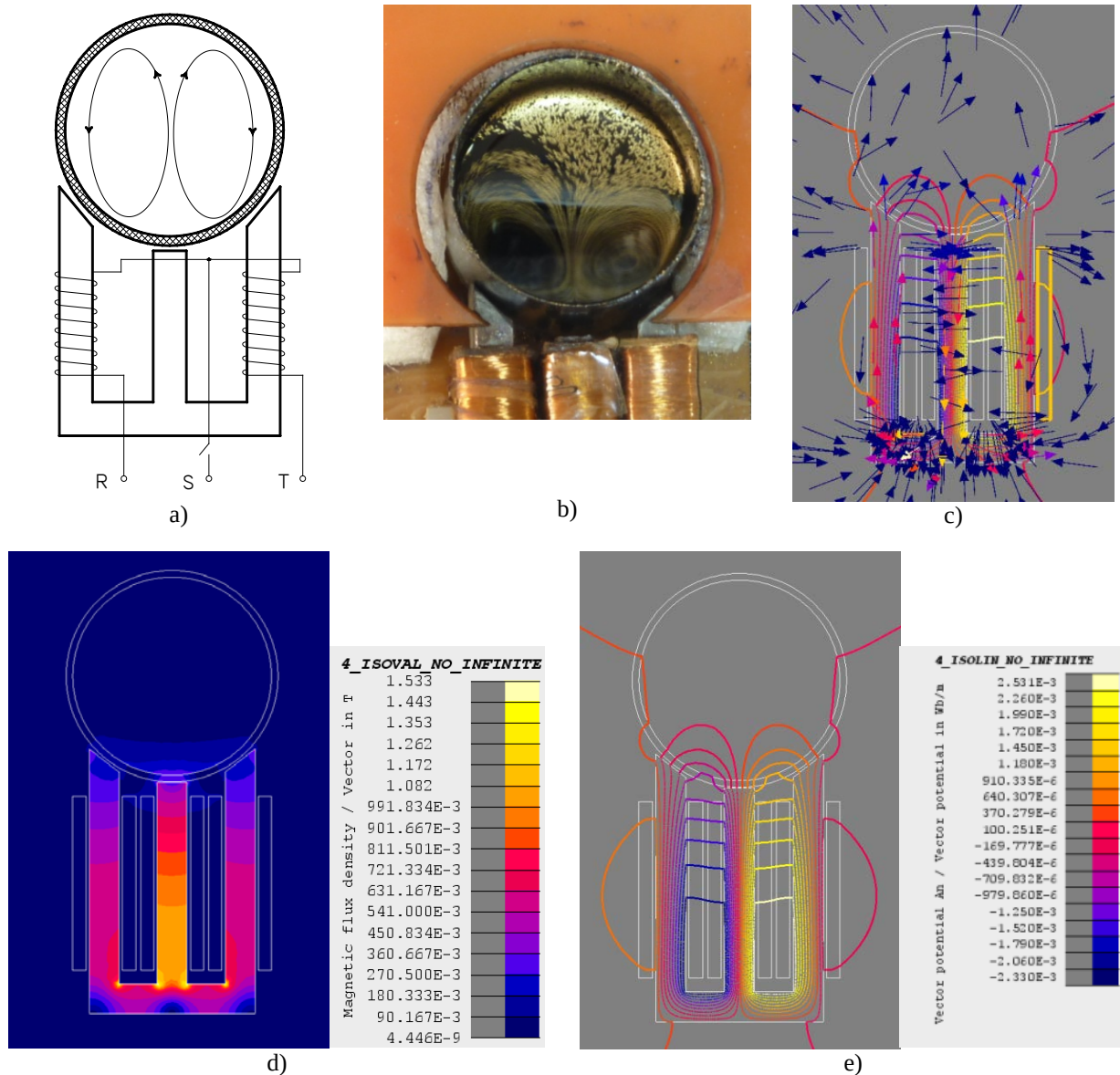


Fig. 5.9 Simularea motorului GROSU pentru conexiunea în V cu faza S nealimentată:
a) schema de alimentare; b) figuri CEUS obținute pe cale experimentală cu ferrofluid; c) direcția liniilor de câmp magnetic; d) harta spectrală a inducției în miezul magnetic; e) distribuția liniilor de câmp magnetic.

CAPITOLUL 6

CONTRIBUȚII PRIVIND UTILIZAREA FIGURILOR CEUS CA SOLUȚIE PENTRU DIAGNOSTICAREA DEFECTELOR BOBINAJULUI STATORIC LA MOTOARELE DE CURENT ALTERNATIV

[168], [175], [192], [193]

6.2 STAND EXPERIMENTAL DE DIAGNOSTICARE CU FIGURI CEUS [192], [193]

Modelul experimental utilizat pentru obținerea figurilor CEUS este constituit, în principal, din statorul unui motor asincron trifazat, al cărui rotor a fost substituit printr-un recipient de probă realizat dintr-un material electroizolant umplut parțial cu ferrofluid. Pentru evidențierea mișcării ferrofluidului și captarea imaginilor CEUS, pe suprafața fluidului a fost presărată o pulbere extrafină de bronz cu rol de indicator [192].

Pentru corelarea imaginilor obținute cu direcția liniilor de câmp, s-a utilizat un ac indicator plasat în centrul statorului care, la alimentarea standului, deviază sau se rotește în direcția câmpului magnetic învârtitor [193].

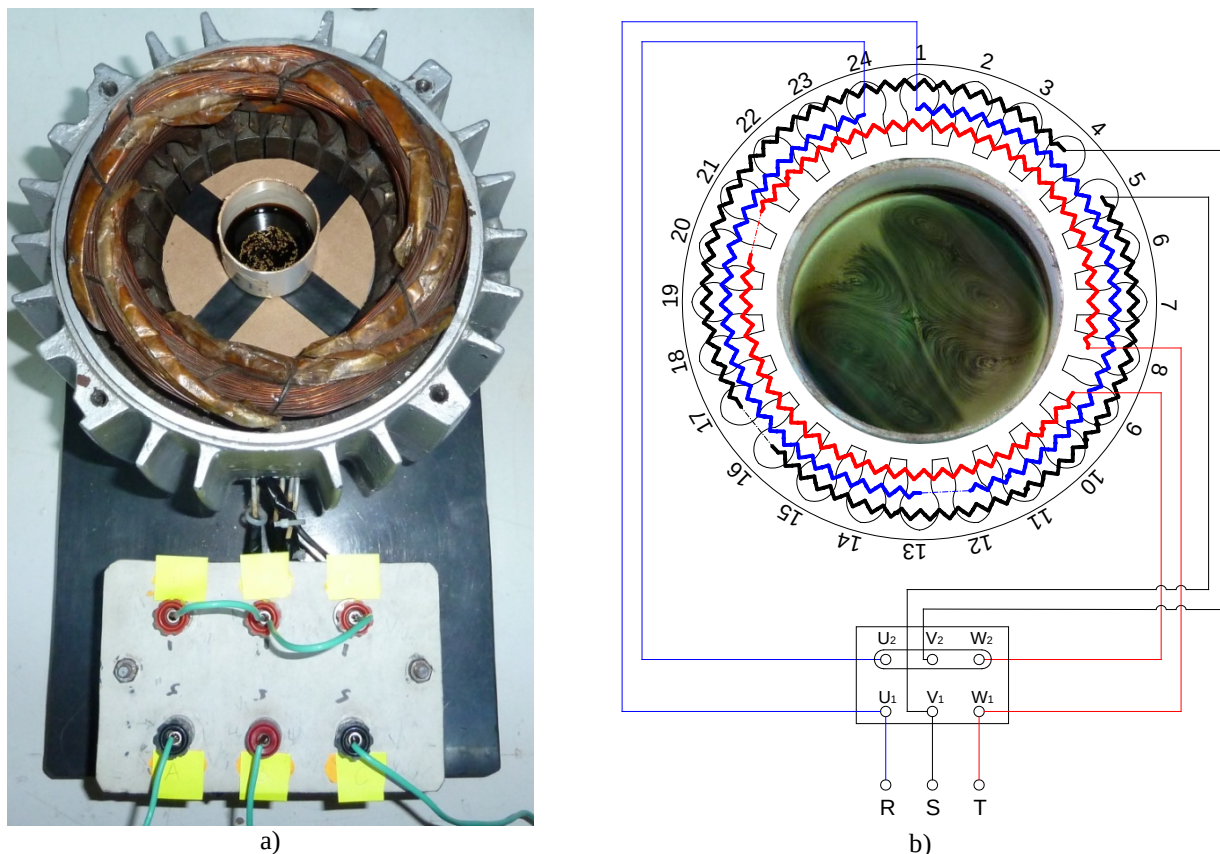


Fig. 6.7 Stand pentru diagnosticarea defectelor bobinajului statoric:

- a) instalația experimentală;
b) dispunerea înfășurărilor de pe cele trei faze în raport cu recipientul cu ferrofluid.

6.3 FIGURILE CEUS OBȚINUTE PENTRU DIVERSE TIPURI DE DEFECT

Așa cum a fost menționat mai sus, funcționarea defectuoasă a unui motor asincron se poate datora fie unor defecte în rețeaua de alimentare fie unor conexiuni greșite la borne sau defecte interne ale înfășurărilor. Pentru exemplificare, în figurile de mai jos, au fost menționate în text defectele simulate, s-au desenat schemele de alimentare și au fost captate imagini atât cu figurile CEUS aferente cât și cu direcția liniilor de câmp, identificată cu ajutorul unui ac indicator.

6.3.1 Defecte în rețeaua de alimentare

Datorită multitudinii de scheme de alimentare și diversității echipamentelor existente în exploatare, nu întotdeauna un defect în rețea produce deconectarea totală a circuitului. Acest fapt conduce uneori la situații anormale în rețeaua de alimentare precum rămânerea în două faze, deficiență resimțită de fiecare receptor în parte.

În cazul funcționării unui stator trifazat, conectat în *triunghi*, cu lipsa unei faze de alimentare, tabloul mișcării este format din patru elipse dispuse pe două coloane principale, simetric față de axa ce trece prin centrul cercului. Se observă și două coloane secundare, formate la rândul lor din câte două elipse concentrice, plasate în lateralul coloanelor principale. Direcția pe care sunt dispuse atât coloanele principale cât și cele secundare corespunde direcției stabilite cu ajutorul acului indicator de câmp magnetic așa cum se observă și în figura 6.8 de mai jos.

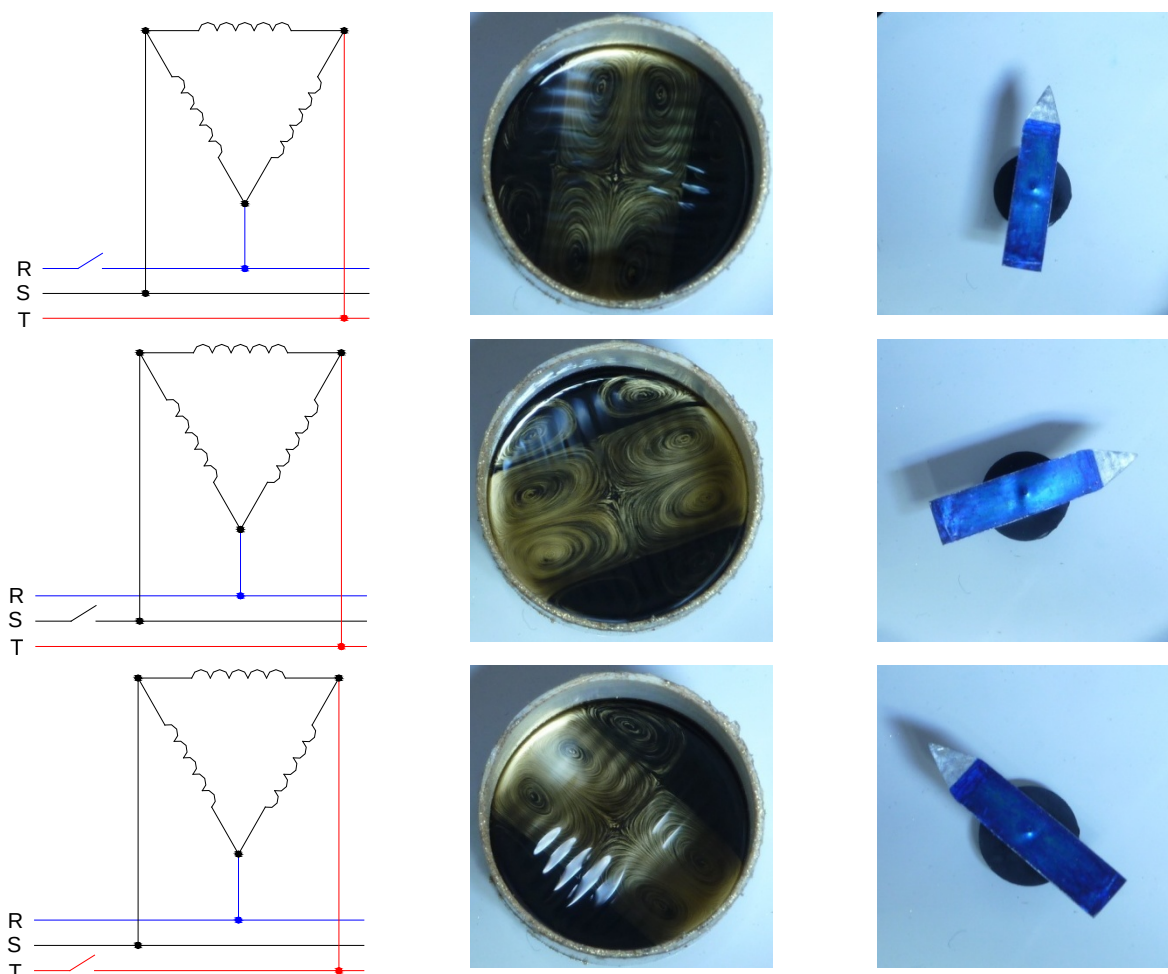


Fig. 6.8 Motor alimentat în conexiunea *triunghi* cu lipsă o fază în rețeaua de alimentare.

6.3.2 Defecte interne ale bobinajului statoric

De cele mai multe ori cauzele externe de funcționare defectuoasă a motoarelor asincrone sunt ușor de depistat (prin măsurarea tensiunii la borne) și facil de remediat datorită accesibilității la rețeaua de alimentare. De asemenea, o conexiune greșită la borne (legarea necorespunzătoare a capetelor înfășurării în *stea* sau *triunghi*) poate fi ușor remediată prin măsurarea înfășurărilor și refacerea legăturilor la tocul de borne. În schimb, un defect sau o legătură greșită în interiorul bobinajului statoric poate reprezenta o problemă destul de complicată ce necesită măsurători detaliate. Totodată, pentru remedierea unor astfel de defecte interne ale statorului poate fi necesară rebobinarea întregii înfășurări, ceea ce duce în unele cazuri la costuri semnificative, uneori mai mari decât achiziția unui motor nou.

Aceste defecte ce pot apărea la capetele sau în interiorul bobinajului statoric sunt ilustrate cu ajutorul figurilor CEUS în cele ce urmează.

Pentru un bobinaj statoric alimentat în conexiunea *triunghi*, ce are una din înfășurări întreruptă, imaginile obținute surprind șase vârtejuri principale plasate pe trei coloane paralele. Cele trei coloane indică o direcție rotită cu aproximativ 20 de grade față de direcția stabilită cu acul indicator așa cum este prezentat în figura 6.10.

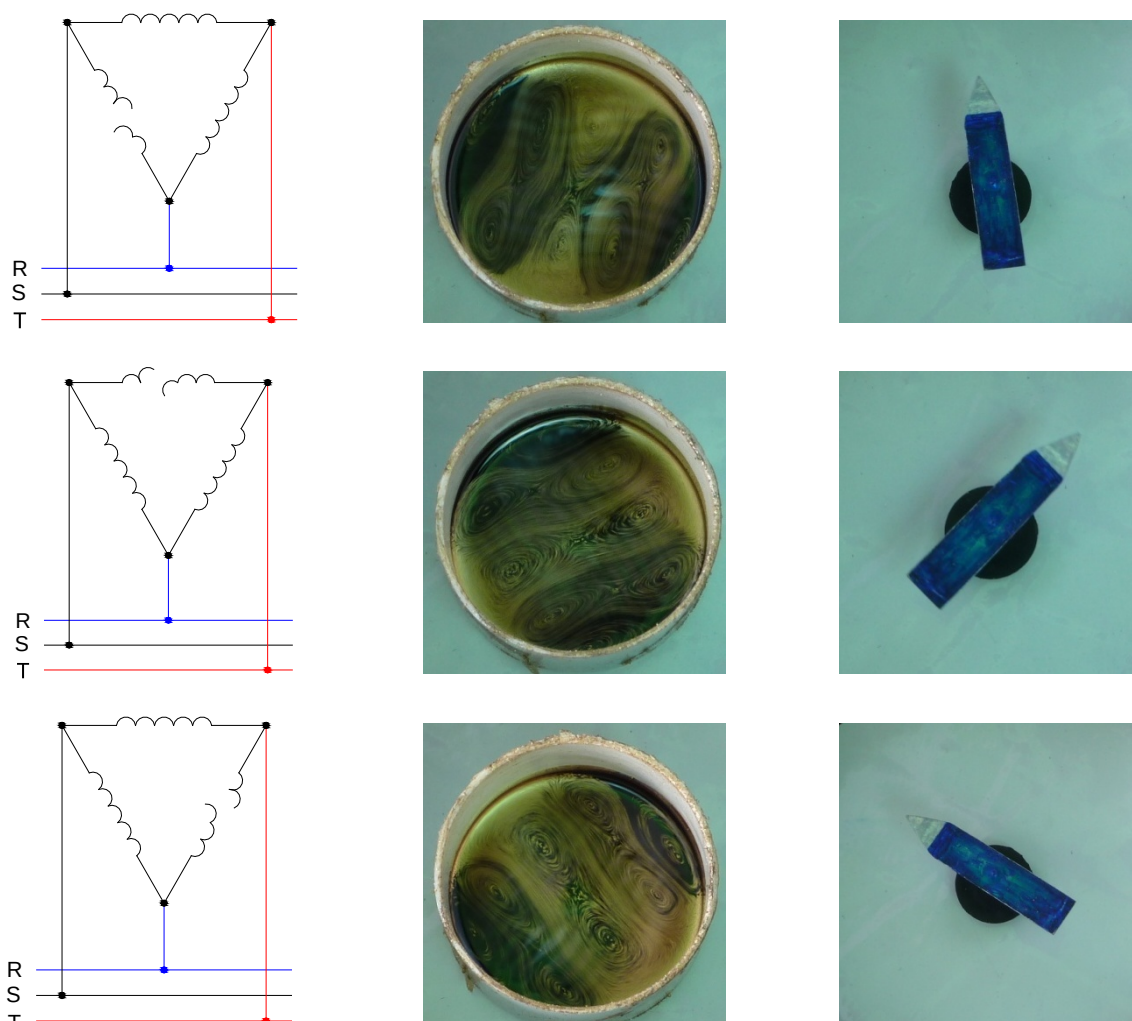


Fig. 6.10 Motor alimentat în conexiunea *triunghi* cu o înfășurare întreruptă în bobinajul statoric.

CAPITOLUL 7

CONCLUZII

7.2 CONTRIBUȚII TEORETICE

Referitor la contribuțiile teoretice, în cadrul tezei de doctorat au fost abordate și transpuse în practică o serie de fenomene specifice domeniului magnetic precum:

➤ Cercetătorul sovietic V. N. Țvetkov observă că o substanță diamagnetică lichidă, introdusă într-un câmp magnetic învârtitor, este antrenată într-o slabă mișcare de rotație. Același efect, însă mult mai intens este observat de R. Moscowitz și R. E. Rosensweig în cazul ferrofluidelor. În această situație, câmpul magnetic învârtitor aplicat imprimă particulelor feromagnetice o mișcare de rotație la nivel macroscopic, mișcare transpusă apoi lichidului purtător. Fenomenul descris a fost studiat analitic de autor și confirmat practic prin experimentele și observațiile făcute în laborator asupra mișcării ferrofluidului plasat în CMÎ.

➤ În cadrul lucrării au fost abordate aspecte privind utilizarea tehnicilor și metodelor psihologice de creație în scopul găsirii unor noi soluții sau variante constructive ale standurilor experimentale realizate. O serie de modificări propuse pentru agitatorul electromecanic cu dublu sens au fost concepute prin aplicarea următoarelor metode: *tehnica analogiei și extrapolării, tehnica inversiei, tehnica combinării, tehnica modificarea-ameliorarea-dezvoltarea și tehnica listelor interrogative de verificare Osborn*.

➤ Analiza *figurilor CEUS* nu a fost limitată doar la ipotezele teoretice și rezultatele experimentale, în cadrul studiului fiind făcut următorul pas, către modelarea matematică. Astfel, utilizând metoda elementului finit, prin intermediul unui program specializat în modelarea câmpurilor magnetice, au fost formulate observații referitor la intensitatea, forma și direcția liniilor de câmp magnetic produse de un stator GROSU și GROSU-CERNOMAZU.

➤ Modelarea pe calculator, folosind metoda elementului finit, a fost axată pe simularea standurilor aferente motorului GROSU conectat în *stea* și alimentat în succesiune directă și inversă; motorului GROSU conectat în *V* cu o fază întreruptă și motorului GROSU-CERNOMAZU cu sursa de alimentare conectată pe înfășurarea de pe coloana unu și trei. În toate cazurile studiate se constată o evidentă corelare a mișcării ferrofluidului, surprinsă în figurile CEUS, cu forma și direcția liniilor de câmp magnetic generate prin modelare.

7.3 CONTRIBUȚII PRACTICE/EXPERIMENTALE

Cele mai importante contribuții experimentale prezentate în teză constau în:

➤ Realizarea, experimentarea și constituirea Depozitului Național Reglementar (DNR) în vederea brevetării unui agitator electromecanic cu dublu sens. Acest dispozitiv este bazat pe efectul de reversare a unei bile supusă acțiunii CMÎ de frecvență variabilă. Modelul experimental este realizat din două bile feromagnetice de dimensiuni diferite, plasate pe înălțimi diferite și supuse acțiunii aceleiași CMÎ. Având în vedere faptul că la o anumită viteză de rotație una din bile își inversează sensul, se obține un efect de agitare mult amplificat.

➤ Realizarea, experimentarea și constituirea DNR în vederea brevetării unei instalații pentru defectoscopia coliviei rotorice cu ajutorul ferrofluidului. Având în vedere faptul că evaluarea calității

turnării unui rotor în colivie este foarte dificilă, soluția propusă este axată pe verificarea continuității și secțiunii barelor de aluminiu. Rotorul încercat este fixat în poziție verticală, trecut printr-un recipient cu ferrofluid și conectat la capete la o sursă de curenți tari. Evaluarea conformității se face prin măsurarea înălțimilor coloanelor de ferrofluid ce se ridică în dreptul fiecărei bare de aluminiu. Dacă pentru una din bare înălțimea coloanei de ferrofluid este mai mică, rezultă că un curent mai mic parcurge bara respectivă, ceea ce conturează premisa existenței unei secțiuni îngustate pe calea de curent, deci defect de turnare.

➤ Pe parcursul stagiului de pregătire doctorală au fost realizate și testate standuri experimentale destinate diagnosticării defectelor din bobinajul statoric. Soluțiile realizate presupun înlocuirea rotorului real cu un recipient cilindric electroizolant, umplut parțial cu ferrofluid pe a cărui suprafață este presărată o pulbere de bronz. Imaginile astfel obținute constituie adevărate amprente ce pot indica cu precizie tipul defectului și chiar faza afectată.

➤ În legătură cu fenomenul de rotație a unui ferrofluid în sens invers CMÎ aplicat, au fost efectuate încercări pe baza *efectului Kagan*. Această comportare poate fi observată atât la ferrofluide cât și la pulberi magnetice și este în strânsă legătură cu *efectul de vârtaj* și *efectul de perete*. În cadrul studiilor experimentale realizate în laboratoarele Universității din Suceava s-a constatat că în masa materialului feromagnetic apar microvârtejuri create de particulele ce se rotesc în sensul CMÎ. Vârtejurile aflate la extremitatea recipientului se ating de pereții vasului purtător și generează astfel o mișcare de rotație mai amplă a materialului feromagnetic în sens invers câmpului aplicat.

➤ Comportarea unor dispersii de particule magnetoactive nestabilizate aflate în CMÎ produs de un stator trifazat a fost un alt caz particular studiat. S-a observat prin experiment tendința inițială a particulelor de a se roti în direcția câmpului magnetic aplicat, urmat apoi de o schimbare bruscă de direcție, în sens invers câmpului. Acest fenomen a fost ulterior extrapolat, studiile fiind îndreptate către comportarea unei bile din material feromagnetic plasate în CMÎ cu viteză de rotație variabilă. În acest caz s-a constatat că, la viteze mici, bila se rotește în sensul CMÎ, iar la creșterea vitezei se produce inversarea sensului de rotație. Pentru acest fenomen de reversare observat în cele două cazuri a fost atribuită, în cadrul unei întruniri științifice, denumirea de *efect CEUS*.

➤ Plecând de la observațiile efectuate de efectuate de R. E. Rosensweig privind comportarea ferrofluidelor sub acțiunea câmpului magnetic produs de un conductor vertical parcurs de curent, autorul a efectuat studii și încercări referitoare la profilul hidrostatic al lichidelor magnetice. S-a observat astfel cum câmpul magnetic creat de conductorul liniar face ca suprafața liberă a ferrofluidului să-și modifice forma, ridicându-se în jurul conductorului. Acest fenomen poate fi explicat prin faptul că fiecare particulă de ferrofluid se comportă ca un dipol magnetic, luând direcția câmpului magnetic aplicat.

➤ O altă direcție de cercetare abordată în cadrul lucrării a fost reprezentată de studiul comportării ferrofluidelor sub acțiunea CMÎ produs de un stator trifazat. În acest sens s-a încercat găsirea unor corelații între schema de alimentare a statorului și mișcarea ferrofluidului imprimată de forma și direcția liniilor de câmp magnetic. Mișcarea de rotație a ferrofluidului a fost evidențiată experimental prin presărarea pe suprafața acestuia a unei pulberi fine de bronz, imaginile astfel captate fiind numite *figuri CEUS*.

➤ *Figurile CEUS* generate experimental cu ferrofluid confirmă pe deplin rezultatele anterior obținute în cadrul Centrului de Cercetare EMAD pentru o suspensie de particule magnetoactive. În acest scop au fost tratate următoarele cazuri:

- motor GROSU conectat în *stea* în succesiune directă și inversă;
- motor GROSU conectat în *stea* cu o fază nealimentată;

- motor GROSU-CERNOMAZU cu sursa de alimentare pe prima și a treia coloană;
- motor GROSU conectat în V ;
- motor GROSU conectat în V cu o fază nealimentată.

În Anexa 7 a lucrării sunt tratate și alte variante de alimentare precum:

- motor GROSU-CERNOMAZU care are pe coloana opusă sursei de alimentare montat un rezistor, o bobină sau un condensator;
- motor GROSU cu bobinele conectate în *stea*, alimentat monofazat și cu rezistor, bobină sau condensator montat pe latura opusă sursei;
- motor GROSU cu bobinele conectate în *triunghi*, alimentat monofazat și cu rezistor, bobină sau condensator montat pe latura opusă sursei.

➤ În cadrul lucrării a fost concepută și testată o soluție de analiză a câmpurilor magnetice produse în statorul mașinilor electrice. Corelații între structura bobinajului statoric, schema de alimentare sau eventuale regimuri de funcționare anormală au fost stabilite prin intermediul *figurilor CEUS*, cu verificarea următoarelor situații:

- conexiunea *triunghi* cu lipsă o fază în rețeaua de alimentare;
- conexiunea *stea* cu lipsă o fază în rețeaua de alimentare;
- conexiunea *triunghi* cu o înfășurare întreruptă în bobinajul statoric;
- conexiunea *stea* la care a fost inversat începutul cu sfârșitul înfășurării;
- conexiunea în V ;
- conexiunea *triunghi deschis* cu înfășurarea nealimentată scurtcircuitată;
- conexiunea *stea* cu o înfășurare scurtcircuitată;
- conexiunea *stea* cu o înfășurare dezlegată și scurtcircuitată.

➤ O altă contribuție practică prezentată în lucrare constă în crearea modelului matematic al motorului GROSU și GROSU-CERNOMAZU utilizând pachetul de programe Flux 2D al companiei CEDRAT. Plecând de la forma, dimensiunile și caracteristicile de material ale standului experimental, a fost construit pe calculator modelul geometric al dispozitivului folosit pentru studiul câmpurilor magnetice.

7.4 PERSPECTIVE DE DEZVOLTARE ULTERIOARĂ A TEMEI

În ceea ce privește direcțiile de cercetare viitoare pot fi abordate următoarele aspecte:

➤ Continuarea încercărilor experimentale pentru CMÎ de frecvență variabilă cu bile de compoziții diferite și realizarea modificărilor la dispozitivul experimental, conform soluțiilor generate prin utilizarea tehnicilor psihologice de creație.

➤ Îmbunătățirea instalației experimentale pentru defectoscopie coliviei rotorice prin testarea unor soluții menite să ușureze operațiunea de diagnosticare.

➤ Experimentarea unor noi scheme de conexiuni ale motorului GROSU și corelarea *figurilor CEUS* astfel obținute cu rezultatele generate de analiza pe calculator prin metoda elementului finit. Aceste elemente pot constitui baza realizării unui instrument didactic util în activitățile educaționale axate pe studiul electromagnetismului.

➤ Încercări privind găsirea unor soluții de îmbunătățire a instalației pentru defectoscopia bobinajului statoric, astfel încât acest dispozitiv să devină un aparat mai ușor de folosit în practică și cu o bună aplicabilitate industrială.

BIBLIORGRAFIE SELECTIVĂ

- [2]. ANTON, I.; DE SABATA, I.; VÉKÁS, L. *Proprietăți și aplicații ale lichidelor magnetice*. În: Tehnologii, Calitate, Mașini, Materiale. București: Editura Tehnică, 1987, pag. 186-212.
- [3]. ANTON, I.; DE SABATA, I.; VÉKÁS, L. *Tendențe actuale în domeniul lichidelor magnetice*. Conferința "Mașini hidraulice și hidrodinamică", Timișoara, 1990.
- [4]. ANTON, I.; VÉKÁS, L.; POTENCZ, I.; et. al *Ferrofluid flow under the influence of rotating magnetic fields*. IEEE Transactions On Magnetics, MAG-16, 2, 1980, pag. 283.
- [9]. BĂLĂ, C.; FETIȚA, A.; LEFTER, V. *Cartea bobinătorului de mașini electrice*. București: Editura Tehnică, 1967.
- [10]. BELOUS, V. *Manualul inventatorului*. București: Editura Tehnică, 1990.
- [14]. BODEA, M. *Studiul M.E.F. al motoarelor asincrone de tip Grosu*. Lucrare de disertație. Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi", Iași.
- [15]. BOGATU, V. *Probe și verificări ale mașinilor electrice*. București: Editura Tehnică, 1968.
- [17]. BUZDUGA, C. *Aplicații ale ferrofluidelor în electrotehnică*, ELSTUD'09 Sesiune de comunicări științifice ale studenților, Volum 1, Număr 3, 2009.
- [18]. BUZDUGA, C. *Contributions to the extension of ferromagnetic powders in electrotechnical applications*. DOCT-US, Suceava: Editura Universității „Ștefan cel Mare”, anul II, numărul 1, 2010, pag. 43-50.
- [19]. BUZDUGA, C. *Contribuții la extinderea aplicațiilor ferrofluidelor și pulberilor feromagnetice în electrotehnică*. Teză de doctorat. Suceava: Universitatea „Ștefan cel Mare”, Facultatea de Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor, 2012.
- [20]. BUZDUGA, C. *Contribuții la extinderea aplicațiilor ferrofluidelor și pulberilor feromagnetice în electrotehnică*. Proiect de cercetare științifică pentru admiterea în a doua etapă de pregătire pentru doctorat. Suceava: Facultatea de Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor, 2009.
- [21]. BUZDUGA, C. *Contribuții teoretice și experimentale la extinderea aplicațiilor ferrofluidelor și pulberilor feromagnetice în electrotehnică. Referat II în cadrul stagiului de pregătire pentru doctorat*. Suceava: Facultatea de Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor, 2010.
- [22]. BUZDUGA, C. *Ferrofluids and their uses in industry*. Suceava: ELS 2009 - 3rd International Symposium on Electrical Engineering and Energy Converters, September 24-25, ISSN 2066-853X2009, pag. 107-110.
- [23]. BUZDUGA, C. *Perspective privind extinderea aplicațiilor ferrofluidelor în electrotehnică*. DOCT-US, Suceava: Editura Universității „Ștefan cel Mare”, Vol. 1, ISSN 2065-3247, 2009, pag. 49-55.
- [24]. BUZDUGA, C. *Stadiul actual în domeniul aplicațiilor ferrofluidelor și pulberilor feromagnetice în electrotehnică. Referat I în cadrul stagiului de pregătire pentru doctorat*. Suceava: Facultatea de Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor, 2010.
- [25]. BUZDUGA, C.; ABDELKADER, B. *Analysis of the impedance variation versus the inclination of a coil with ferrofluid core*. DOCT-US, Suceava: Editura Universității „Ștefan cel Mare”, Vol 1, ISSN 2065-3247, 2011, pag. 15-18.
- [26]. BUZDUGA, C.; ABDELKADER, B. *Measurement magnetic force that be exercised on the tube with ferrofluid*. București: Buletinul AGIR, An XVI, nr. 4/2011, ISSN-L 1224-7928. pag. 243-248.
- [27]. BUZDUGA, C.; ABDELKADER, B.; BEȘLIU, V.; MARUSIC, G.; FILOTE, C.; CIUFUDEAN, C. *Comportarea ferrofluidelor în câmpuri magnetice de joasă intensitate*. Chișinău: ICMCS - 2011 -7th International Conference on Microelectronics and Computer Science, September 22-24, ISBN 978-9975-45-174-1, pag. 15-19.
- [30]. BUZDUGA, C.; BACIU, I.; NEGRU, M. B.; NIȚAN, I.; OLARIU, E. D.; ROMANIUC, I.; CERNOMAZU, D. *Stand pentru studiul ferrofluidelor, soluțiilor coloidale feromagnetice și pulberilor magnetoactive*. Cerere de brevet de invenție nr. A/01161 din 16.11.2011, OSIM București.
- [31]. BUZDUGA, C.; BACIU, I.; NIȚAN, I.; NEGRU, M. B.; OLARIU, E. D.; ROMANIUC, I.; CERNOMAZU, D. *Stand pentru studiul ferrofluidelor*. Cerere de Brevet de Invenție nr. A/01200 din 23.11.2011, OSIM București.
- [32]. BUZDUGA, C.; CERNOMAZU, D.; CIUFUDEAN, C.; FILOTE, C. *Relays top gear: ferrodinamic versus electrodynamic*. 20th Soft Magnetic Materials Conference 2011, SMM 20, Kos Island, Greece, 18 - 22 September, 2011.
- [37]. BUZDUGA, C.; NIȚAN, I.; NEGRU, M. B.; BACIU, I.; SOREA, N.; UNGUREANU, C.; OLARIU, E. D.; GEORGESCU, Șt. D.; CERNOMAZU, D. *Stand pentru studiul ferrofluidelor*. Cerere de Brevet de Invenție nr. A/01098 din 02.11.2011, OSIM București.
- [39]. CĂLUGĂRU, Gh.; COTAE, C. *Lichide magnetice*. București: Editura Științifică și Enciclopedică, 1978, pag. 61-68.
- [43]. CERNOMAZU, D. *Manual pentru brevetarea invențiilor în România – curs practic*. Suceava: Universitatea „Ștefan cel Mare”, Facultatea de Inginerie Electrică, 1997.
- [45]. CERNOMAZU, D. *Motor asincron monofazat*. Brevet RO Nr. 116235 B, 2000.
- [46]. CERNOMAZU, D. *Procedeu pentru rotirea unui ferrofluid*. Brevet RO nr. 121244B1 din 30.01.2007, OSIM București.
- [51]. CERNOMAZU, D.; NEGRU, M. B. *Metodă pentru prepararea ferrofluidelor*. Propunere de invenție pentru care Depozitul Național Reglementar este în curs de constituire la OSIM București.
- [53]. CERNOMAZU, D.; NEGRU, M. B. *Procedeu pentru obținerea unui ferrofluid*. Cerere de brevet de invenție nr. A/00464 din 20.05.2004, OSIM București.

- [56]. CERNOMAZU, D.; NEGRU, M. B.; MANDICI, L. *Considerații și contribuții cu privire la rotirea unui ferofluid într-un câmp magnetic învârtitor*. În: A treia Conferință Internațională de Sisteme Electromecanice și Energetice–SIELMEN 2001-vol. I, ISBN: 9975-9638-6-2, Chișinău, Rep. Moldova, 4 – 6 octombrie 2001, pag. 75.
- [58]. CÎMPEANU, A. *Mașini electrice*. Craiova: Editura Scrisul Românesc, 1977.
- [59]. COJAN, M.; SIMION, AL.; LIVADARU, L.; MARDARASEVICI, G. *Mașini electrice. Aplicații practice*. Iași: Editura Shakti, 1998.
- [60]. COLȚEU, A. *Proprietăți ale lichidelor magnetice în câmpuri electromagnetice staționare. Teză de doctorat*. Timișoara: Facultatea de Electrotehnică, 1981.
- [61]. COTAE, C. *Asupra comportării coloizilor magnetici în câmp magnetic*. Teză de doctorat. Iași: Institutul Politehnic "Gh. Asachi", Facultatea de Electrotehnică, 1982.
- [63]. COTAE, C.; CĂLUGĂRU, Gh. *Lichide magnetice*. București: Editura Științifică și Enciclopedică, 1978.
- [74]. FRANSUA, AL.; MĂGUREANU, R. *Mașini și acționări electrice. Elemente de execuție*. București: Editura Tehnică, 1986.
- [76]. GHEMKE, R. *Depannage des machines électriques – traduit du russe*. Moscou: Éditions Mir, 1978, pag. 36-53; pag. 139-149.
- [80]. GROSU, Șt. *Motoare electrice asincrone, având statorul cu trei poli aparenti*. Brevet RO Nr. 61012.
- [81]. GROSU, Șt. *Motoare electrice de mică putere*. În: Electrotehnica, 20, nr. 10, 1972, pag. 294-393.
- [82]. GROSU, Șt. *Three-phase electric motor*. Brevet SUA, Nr. 3358165.
- [83]. GROSU, Șt. *Wechselstrommotor*. Brevet Austria, Nr. 272442.
- [84]. GROSU, Șt.; PREDA, V. *Motor electric monofazat cu trei poli aparenti*. (Institutul de cercetare și proiectare pentru industria electrotehnică), Brevet RO Nr. 59361, 1975.
- [88]. HATNEAN, I. *Studiul aplicațiilor fluidelor magnetice în electrotehnică*. Proiect de diplomă. Suceava: Universitatea "Ștefan cel Mare", Facultatea de Inginerie Electrică, 2001.
- [89]. HERȚANU, R. M. *Contribuții la utilizarea ferofluidelor în actuatori electromagnetici*. Teză de doctorat. Iași: Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi”, Facultatea de Inginerie Electrică, Energetică și Informatică Aplicată, 2011.
- [105]. LAZU, C. *Mașini electrice*. București: Editura Didactică și Pedagogică, 1966, pag. 38-66.
- [106]. LĂZĂROIU, D. F.; ȘLAHER, S. *Mașini electrice de mică putere*. București: Editura Tehnică, 1973.
- [112]. LUCA, E.; CĂLUGĂRU, Gh.; BĂDESCU, R.; COTAE, C.; BĂDESCU, V. *Ferofluidele și aplicațiile lor în industrie*. București: Editura Tehnică, 1978.
- [114]. MAKSAJ, Șt.; BISTRIAN, D. *Introducere în metoda elementelor finite*. Iași: Editura CERMI, 2008.
- [115]. MANDICI, L. *Contribuții privind realizarea motoarelor liniare în sisteme de acționare de viteză redusă*. Teză de doctorat. Iași: Universitatea Tehnică "Gh. Asachi", Facultatea de Electrotehnică, 1998.
- [118]. MILICI, L. D.; NIȚAN, I.; MILICI, M. R.; CHATZIATHANASIOU, V.; PAPAOSTAS, K. *Study about influence of power system operation and control of the piezoelectric actuators*. In: International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering - EPE 2014, vol. IEEE: CFP1447S-USB, (indexat ISI – Accession Number: WOS 000353565300057), 16-18 Octombrie, 2014, Iași, Romania, ISSN/ISBN: 978-1-4799-5849-8, pag. 341-344.
- [127]. MOORE, A. D. *Invenție, descoperire, creativitate*. București: Editura Enciclopedică Română, 1975.
- [129]. NEGRU, M. B. *Contribuții privind extinderea aplicațiilor ferofluidelor și a pulberilor feromagnetice în electrotehnică*. Teză de doctorat. Suceava: Universitatea „Ștefan cel Mare”, Facultatea de Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor, 2012.
- [130]. NEGRU, M. B. *Rezolvări teoretice și experimentale preliminare în legătură cu aplicațiile ferofluidelor și pulberilor magnetice în electrotehnică. Referat III în cadrul stagiului de pregătire pentru doctorat*. Suceava: Universitatea „Ștefan cel Mare”, Facultatea de Inginerie Electrică, 2004.
- [131]. NEGRU, M. B. *Stadiul actual cercetărilor privind efectele generate în ferofluide, cu referiri speciale la efectele generate de un câmp magnetic rotitor. Referat I în cadrul stagiului de pregătire pentru doctorat*. Suceava: Universitatea „Ștefan cel Mare”, Facultatea de Inginerie Electrică, 2003.
- [132]. NEGRU, M. B. *Stadiul actual al tehnologiilor de fabricație și al aplicațiilor ferofluidelor și pulberilor magnetice în tehnică. Referat II în cadrul stagiului de pregătire pentru doctorat*. Suceava: Universitatea „Ștefan cel Mare”, Facultatea de Inginerie Electrică, 2003.
- [135]. NEGRU, M. B.; CERNOMAZU, D.; MANDICI, L.; MINESCU, D.; UNGUREANU, C.; SAVU, E.; PRODAN, C. *Agitator pentru fluide dielectrice*. Cerere de brevet de invenție nr. a 2002 00412 A2. În B.O.P.I. nr. 2/2004, OSIM București, pag. 19.
- [137]. NEGRU, M. B.; PRISACARIU, I.; MINESCU, D.; SOREA, N.; CERNOMAZU, D. *Considerations and contributions about fault detection of cage winding-type rotors*. În: International Symposium on Electrical Engineering and Energy Converters-ELS2007. ISBN: 973-666-259-1, Suceava, România, 27-28 septembrie 2007, pag. 29.
- [138]. NEGRU, M. B.; PRISACARIU, I.; POENAR, N.; MINESCU, D.; JEDER, M.; SOREA, N.; CERNOMAZU, D. *Contributions about the improvement of sense of rotation indicators of rotational magnetic field of an asynchronous motor*. În: International Symposium on Electrical Engineering and Energy Converters-ELS2007. ISBN: 973-666-259-1, Suceava, România, 27-28 septembrie 2007, pag. 35.
- [140]. NEGRU, M. B.; SOREA, N.; CREȚU, N.; BACIU, I.; AVRĂMIA, C.; JEDER, M.; OLARIU, E. D.; CERNOMAZU, D. *Metodă privind defectoscopia rotoarelor în colivie*. Brevet de invenție RO Nr. 122756 B1, 30.12.2009, OSIM București.

- [148]. PAPELL, S. S. *Low viscosity Magnetic Fluid Obtained by the colloidal suspension of Magnetic Particles*. US Patent No. 3 215 572, nov. 1965.
- [149]. PARK, G. S.; PARK, S. H. *Design of a Magnetic Fluid Linear Pump*. IEEE Transactions on Magnetics 35, 1999, pag. 4058-4060.
- [152]. PIETRĂREANU, E. *Agenda electricianului*. Ediția a IV-a revăzută și completată. București: Editura Tehnică, 1986.
- [161]. RĂDUȚI, C.; NICOLESCU, E. *Mașini electrice rotative fabricate în România*. București: Editura Tehnică, 1981.
- [164]. ROSENSWEIG, R. E. *Ferrohydrodynamics*, Cambrige: Cambridge University Press, 1985, pag. 136-137.
- [165]. ROSENSWEIG, R. E. *Magnetic fluid seals*. United States Patent Office, No. 3 620 584, 1971.
- [166]. ROSENSWEIG, R. E. *Magnetic fluids*. Int. Science and Technology, july, 1966, pag. 48.
- [168]. STANA, I.; NIȚU, N. *Întreținerea și repararea mașinilor electrice*. București: Editura Tehnică, 1985.
- [171]. UNGUREANU, C.; GRAUR, A. *FEM Analysis of a New Electromechanical Converter with Rolling Rotor and Axial Air-Gap*. In: Advances in Electrical and Computer Engineering, vol. 15, no. 4, pag. 69-74, 2015, DOI: 10.4316/AECE.2015.04009.
- [173]. VÉKÁS, L. ș.a. *Magnetic fluids – a special category of nanomaterials. Preparation and complex characterization methods*. Micro and nanostructures, Ed. Academiei Române, pag.127-157, 2001.
- [176]. VRÎNCEANU, Gh.; SCHNELL, Fl. *Stabilirea defectelor în instalațiile electrice de joasă tensiune*. București: Editura Tehnică, 1976, pag. 58-70.
- [177]. * * * Flux® 9 2D/3D Applications, User`s guide – Volume 1, Geometry and mesh. CEDRAT 2006.
- [178]. * * * Flux® 9 2D/3D Applications, User`s guide – Volume 2, Physical description – Circuit coupling. CEDRAT 2006.
- [182]. * * * Disponibil la: <http://www.ferrotec.com/>, accesat la data 20.11.2015.
- [187]. * * * Disponibil la: <http://www.carolina.com>, accesat la data 12.07.2015.

Lista lucrărilor publicate în domeniul tezei de doctorat:

- [188]. **ȚANȚA, O. M.** *Current state of research and ferrofluid applications*. In: International Symposium on Electrical Engineering and Energy Converters ELS 2013 - BULETINUL AGIR, An XVIII, nr. 4/2013, pag. 281-284, ISSN-L: 1224-7928, Online: ISSN 2247-3548, indexată BDI: INDEX COPERNICUS INTERNATIONAL.
- [189]. **ȚANȚA, O. M.** *Stadiul actual al cercetărilor în domeniul unor fenomene și efecte legate de utilizarea ferofluidelor în tehnică – Raport I în cadrul stagiului de pregătire pentru doctorat*. Suceava: Universitatea „Ștefan cel Mare”, Facultatea de Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor, 2014.
- [190]. **ȚANȚA, O. M.**; POIENAR, M.; ROMANESCU, A. N.; NEGRU, M. B.; CERNOMAZU, D. *New Aspects Concerning the CEUS Figures Identified at Ferrofluid Utilisation in Rotating Magnetic Field*. In: Analele Universității „Eftimie Murgu” Reșița, Fascicula de Inginerie, anul XXI, nr. 2, 2014, pag. 135 – 144, ISSN: 1453-7397.
- [191]. **ȚANȚA, O. M.**; POIENAR, M.; NIȚAN, I.; CENUȘĂ, M.; ROMANESCU, A. N. *Applications based on variable frequency rotating magnetic field. Electromechanical agitator with dual direction*. In: 3th Edition of Scientific Conference of Doctoral Schools from UDJ Galați, 4th-5th of June 2015.
- [192]. **ȚANȚA, O. M.**; ROMANESCU, A. N.; CENUȘĂ, M.; NIȚAN, I.; POIENAR, M. *Solutions for diagnosing faults in asynchronous motor stator through a ferrofluid installation*. In: 3th Edition of Scientific Conference of Doctoral Schools from UDJ Galați, 4th-5th of June 2015.
- [193]. **ȚANȚA, O. M.** *Contribuții teoretice și experimentale preliminare cu privire la unele efecte particulare legate de utilizarea pulberilor feromagnetice și a ferofluidelor în tehnică – Raport II în cadrul stagiului de pregătire pentru doctorat*. Suceava: Universitatea „Ștefan cel Mare”, Facultatea de Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor, 2015.
- [194]. **ȚANȚA, O. M.**; MILICI, L. D.; POIENAR, M.; ROMANESCU, A. N.; CENUȘĂ, M. *Diagnosing faults in rotor cage through an ferrofluid installation*. In: 6th International Symposium on Electrical Engineering and Energy Converters ELS 2015 - BULETINUL AGIR, An XXI, Supliment nr. 1/2016, pag. 39-43, ISSN: 1224-7928, Cod CNCIS: 415, Online: ISSN 2247-3548, indexată BDI: INDEX COPERNICUS INTERNATIONAL.
- [195]. **ȚANȚA, O. M.** *Utilizarea tehnicilor psihologice de creație în scopul dezvoltării standurilor experimentale folosite la studiul ferofluidelor*. Sesiune de comunicări științifice ale studenților ELSTUD 2016, Suceava: Universitatea „Ștefan cel Mare”, Facultatea de Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor, iun.2016.
- [196]. **ȚANȚA, O. M.**; OLARIU, E. D.; POIENAR, M.; MILICI, L. D. *CEUS Figures Finite Element Modelling*. In press: 9th International Conference on Electrical and Power Engineering, 20th – 22th October, 2016, Iași, România.
- [197]. CERNOMAZU, D.; **ȚANȚA, O. M.**; MANDICI, L.; POIENAR, M.; ROMANESCU, A. N.; NIȚAN, I.; OLARIU, E. D.; UNGUREANU, C. *Instalație pentru defectoscopia coliviei rotorice*. Cerere de Brevet de Invenție nr. A/00570 din 28.07.2014.
- [198]. GRAUR, A.; MILICI, M. R.; MILICI, L. D.; RAȚĂ, M.; **ȚANȚA, O. M.**; NIȚAN, I.; ROMANIUC, I.; NEGRU, M. B.; CERNOMAZU, D. *Agitator electromecanic cu acțiune dublă*. Cerere de Brevet de Invenție nr. A/00330 din 29.04.2013, OSIM București.

