

**UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA
FACULTATEA DE ELECTROTEHNICĂ**

Ing. Alin-Iulian DOLAN

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

**Contribuții la modelarea câmpurilor și a
regimurilor tranzitorii în echipamente electrice**

**Conducător științific:
Prof. dr. ing. Grigore A. CIVIDJIAN**

CRAIOVA, 2009

Adresez calde mulțumiri conducătorului științific, d-lui prof. dr. ing. Grigore A. Cividjian, pentru îndrumarea deosebit de meticuloasă, consultanța științifică și observațiile critice extrem de prețioase oferite pe tot parcursul realizării acestei lucrări.

Mulțumesc domnilor acad. prof. dr. doc. ing. Andrei Țugulea, prof. dr. ing. Mihai Iordache, prof. dr. ing. Dumitru Topan și prof. dr. ing. Ioan Popa, pentru onoarea ce mi-au făcut acceptând propunerea de a face parte din comisia de susținere.

Mulțumesc o dată în plus d-lui prof. dr. ing. Dumitru Topan și d-lui prof. dr. ing. Ioan Popa, pentru încurajările oferite la momentul oportun pentru întreprinderea de demersuri în vederea obținerii de burse în străinătate, care mi-au îmbogățit atât orizontul științific cât și cel lingvistic.

De asemenea, mulțumesc Agenției Universitare a Francofoniei, pentru suportul financiar acordat pentru realizarea mobilității interuniversitare și d-lui prof. dr. Serge Monchaud de la Institutul Național de Științe Aplicate din Rennes, pentru atenta coordonare a debutului acesteia în cadrul Universității Tehnice din Sofia.

Mulțumesc Institutului Francez din Sofia, pentru ospitalitate și sprijinul deosebit în asimilarea rapidă a limbii franceze.

Țin să mulțumesc d-lui prof. dr. ing. Ivan Yatchev de la Universitatea Tehnică din Sofia, pentru ospitalitatea deosebită și ajutorul acordat în deprinderea utilizării programului ANSYS de-a lungul stagiilor de cercetare efectuate la Școala doctorală din cadrul acestei universități, făcând posibilă extinderea părților aplicative aferente capitolelor III și IV.

Aduc pe această cale mulțumiri d-lui prof. dr. ing. Leonardo-Geo Mănescu, pentru amabilitatea de a-mi fi facilitat legătura cu profesorii și specialiștii de la Laboratorul de inginerie electrică din Grenoble, referindu-mă la prof. dr. ing. Gérard Meunier, prof. dr. ing. Albert Foggia și prof. dr. ing. Thierry Chevalier, cărora le mulțumesc pentru ospitalitate și sprijinul de care am beneficiat pentru deprinderea utilizării programului FLUX de-a lungul stagiului de cercetare efectuat la acest laborator.

În același timp, mulțumesc firmei CEDRAT din Grenoble, pentru acordarea dreptului de utilizare personală a programului FLUX, ceea ce a făcut posibilă realizarea părților aplicative aferente capitolelor V și VI.

Doresc să le mulțumesc tuturor colegilor din Catedra de Aparate și tehnologii electrice, pentru multiplele încurajări și sfaturi colegiale deosebit de utile oferite de-a lungul elaborării lucrării.

Mulțumesc și sunt profund recunoscător familiei mele, pentru suportul moral, înțelegerea și răbdarea manifestate constant, ajutându-mă să duc la bun sfârșit această teză.

CUPRINS

| | | |
|---|-----|------|
| Lista abrevierilor | 9 | (5) |
| INTRODUCERE | 11 | (6) |
| 1 FORMULĂRI ALE METODEI ELEMENTELOR FINITE | 13 | (7) |
| 1.1 Introducere | 13 | |
| 1.2 Formularea proiectivă | 15 | (7) |
| 1.2.1 Metoda reziduurilor ponderate | 17 | |
| 1.3 Formularea variațională | 18 | (7) |
| 1.4 Aproximarea funcțiilor necunoscute | 19 | (7) |
| 1.5 Formulări ale metodei elementelor finite în magnetostatică | 22 | (7) |
| 1.5.1 MEF în formularea potențialului magnetic scalar (PMS) | 23 | (7) |
| 1.5.1.1 Formularea PMS redus (PMSr) | 23 | |
| 1.5.1.2 Formularea PMS total (PMSt) | 24 | |
| 1.5.1.3 Formularea PMS diferență (PMSd) | 24 | |
| 1.5.1.4 Formularea PMS generalizat (PMSg) | 25 | |
| 1.5.1.5 Formularea PMS de muchie (PMSm) | 26 | |
| 1.5.2 MEF în formularea potențialului magnetic vector (PMV) | 27 | (7) |
| 1.5.3 MEF în formularea elementelor muchie (EM) | 29 | (8) |
| 1.6 Concluzii | 31 | |
| 2 INDUCTANȚA UNUI ELECTROMAGNET TIP PLONJOR | 33 | (8) |
| 2.1 Introducere | 33 | (8) |
| 2.2 Metoda aproximării cu puteri a condițiilor de frontieră | 33 | (8) |
| 2.3 Utilizarea MAPCF la calculul inductanței unui electromagnet tip plonjor | 36 | (9) |
| 2.3.1 Calculul funcției $F(\alpha, z)$ | 36 | |
| 2.3.2 Calculul inductanței interne a electromagnetului 1 tip plonjor | 40 | (9) |
| 2.3.3 Soluția numerică și verificarea experimentală | 43 | (10) |
| 2.3.4 Aplicația IPTM | 47 | |
| 2.4 Concluzii | 48 | |
| 3 CARACTERISTICA STATICĂ A UNUI ELECTROMAGNET TIP PLONJOR | 49 | (11) |
| 3.1 Introducere | 49 | |
| 3.2 Calculul numeric al forțelor electromagnetice | 50 | (11) |
| 3.2.1 Metoda tensorului lui Maxwell (MTM) | 50 | (11) |
| 3.2.2 Metoda lucrului virtual (MLV) | 54 | (11) |
| 3.2.3 Metoda surselor echivalente (MSE) | 58 | |
| 3.3 Determinarea numerică a caracteristicii statice a electromagnetului 2 tip plonjor și verificarea experimentală | 60 | (12) |
| 3.4 Determinarea teoretică a caracteristicii statice a electromagnetului 2 tip plonjor | 68 | (13) |
| 3.5 Concluzii | 70 | |
| 4 DISPERSIA CÂMPULUI MAGNETIC ȘI MODELAREA SUPRATENSIUNILOR ÎNTR-UN AUTOTRANSFORMATOR DE PUTERE MULTI-ÎNFĂȘURĂRI | 71 | (15) |
| 4.1 Introducere | 71 | |
| 4.2 Reactanța de dispersie. Tensiunea de scurtcircuit | 74 | |
| 4.2.2 Încercarea în gol la tensiune nominală | 76 | |
| 4.2.3 Încercarea de scurtcircuit la tensiune redusă și curent nominal | 77 | |
| 4.3 Tensiunea de scurtcircuit a autotransformatorului de putere multi-înfășurări | 79 | (15) |
| 4.3.1 Perechea de înfășurări primar-secundar | 80 | (15) |
| 4.3.2 Perechea de înfășurări terțiar-primar | 81 | |
| 4.3.3 Perechea de înfășurări terțiar-secundar | 81 | |
| 4.4 Evaluarea numerică a energiei câmpului magnetic și a reactanțelor de scurtcircuit cu ajutorul programului FEMM | 82 | (16) |
| 4.4.1 Modelul 2-D și condițiile pe frontieră | 82 | (16) |
| 4.4.2 Rezultatele numerice 2-D ale încercărilor de scurtcircuit | 85 | (17) |
| 4.5 Evaluarea numerică a energiei câmpului magnetic și a reactanțelor de scurtcircuit cu ajutorul programului ANSYS | 88 | (17) |
| 4.5.1 Modelul 3-D și condițiile pe frontieră | 88 | |
| 4.5.2 Rezultatele numerice 3-D ale încercărilor de scurtcircuit | 89 | |
| 4.5.3 Optimizarea simulărilor 3-D prin gestiunea memoriei | 92 | (18) |
| 4.6 Modelarea supratensiunilor atmosferice în autotransformatorul de putere multi-înfășurări | 94 | (18) |
| 4.6.1 Influența înfășurării terțiare aflate în scurtcircuit | 94 | |
| 4.6.2 Inductanțele proprii și mutuale pentru înfășurarea terțiară aflată în scurtcircuit | 96 | (18) |
| 4.6.3 Capacitatea unei perechi de galeți cu înfășurările interconectate | 98 | |
| 4.6.4 Modelarea simplificată a supratensiunilor atmosferice pe borna în gol a înfășurării de reglaj | 99 | |
| 4.7 Concluzii | 101 | |

| | | | |
|-----------|--|-----|------|
| 5 | SIMULAREA NUMERICĂ A PĂTRUNDERII CÂMPURILOR ELECTRIC ȘI MAGNETIC ÎN BARE MASIVE DREPTUNGHILARE | 103 | (20) |
| 5.1 | Introducere | 103 | |
| 5.2 | Evaluarea analitică a distribuției câmpului magnetic | 104 | (20) |
| 5.2.1 | Distribuția câmpului magnetic exterior | 104 | |
| 5.2.2 | Distribuția câmpurilor electric și magnetic la injectarea unei trepte de curent | 106 | (20) |
| 5.2.3 | Distribuția câmpurilor electric și magnetic la aplicarea unei trepte de tensiune | 107 | |
| 5.3 | Simularea numerică a pătrunderii câmpurilor electric și magnetic în sistemul de bare masive dreptunghiulare | 108 | (21) |
| 5.3.1 | Soluții pentru problemele cu frontieră deschisă | 108 | |
| 5.3.2 | Utilizarea FLUX în simularea pătrunderii câmpurilor electric și magnetic în sistemul de bare masive dreptunghiulare | 109 | |
| 5.3.3 | Utilizarea FEMM în analiza câmpului magnetic inițial în sistemul de bare masive | 110 | |
| 5.3.4 | Evaluarea numerică a câmpului magnetic exterior | 111 | (21) |
| 5.3.5 | Evaluarea numerică a distribuției câmpurilor electric și magnetic la injectarea unei trepte de curent | 117 | (23) |
| 5.3.6 | Evaluarea numerică a distribuției câmpurilor electric și magnetic la aplicarea unei | 121 | |
| 5.4 | Concluzii | 126 | |
| 6 | DETERMINAREA NUMERICĂ A PARAMETRIILOR TRANZITORII AI UNUI SISTEM DE BARE MASIVE DREPTUNGHILARE | 127 | (25) |
| 6.1 | Parametrii tranzitorii ai circuitelor electrice liniare | 127 | (25) |
| 6.1.1 | Introducere | 127 | |
| 6.1.2 | Problema parametrilor tranzitorii | 127 | |
| 6.1.3 | Determinarea câmpului electromagnetic asociat unui element de circuit multipolar liniar | 130 | |
| 6.1.3.1 | Ecuatiile lui Maxwell și teorema energiei electromagnetice | 130 | |
| 6.1.3.2 | Definirea conceptului de element de circuit electric în regim variabil | 131 | |
| 6.1.3.3 | Problema generală a determinării câmpului electromagnetic variabil. Teorema de unicitate. Teorema de superpoziție | 133 | |
| 6.1.3.3.1 | Exprimarea potențialelor bornelor în funcție de curenții aduși din exterior | 135 | |
| 6.1.3.3.2 | Exprimarea curenților aduși din exterior în funcție de potențialele bornelor | 136 | |
| 6.1.4 | Parametrii tranzitorii ai elementelor de circuit nefiliforme și cu pierderi suplimentare | 137 | (25) |
| 6.1.4.1 | Introducerea parametrilor tranzitorii pentru elementul de circuit dipolar | 137 | |
| 6.1.4.2 | Elementul de circuit dipolar inductiv în regim cvasistaționar magnetic | 139 | |
| 6.1.4.3 | Elementul de circuit dipolar capacitiv în regim cvasistaționar electric | 140 | |
| 6.1.4.4 | Relațiile integrale dintre mărimile instantanee ale curenților și tensiunilor | 141 | (25) |
| 6.1.4.5 | Determinarea experimentală a parametrilor tranzitorii | 143 | (25) |
| 6.1.5 | Concluzii | 144 | |
| 6.2 | Utilizarea programului FLUX în determinarea parametrilor tranzitorii ai sistemului de bare masive dreptunghiulare | 146 | (26) |
| 6.2.1 | Introducere | 146 | |
| 6.2.2 | Determinarea rezistenței și inductivității tranzitorii la injectarea unui curent treaptă | 148 | (26) |
| 6.2.3 | Determinarea rezistenței și inductivității tranzitorii la injectarea unui curent rampă | 150 | |
| 6.2.4 | Determinarea conductanței și capacității tranzitorii la aplicarea unei tensiuni treaptă | 152 | |
| 6.2.5 | Determinarea conductanței și capacității tranzitorii la aplicarea unei tensiuni rampă | 154 | |
| 6.2.6 | Concluzii | 155 | |
| 7 | CONTRIBUȚII ORIGINALE ȘI CONCLUZII | 157 | (27) |
| | REFERINȚE BIBLIOGRAFICE | 165 | (33) |
| | ANEXE | | |
| A.1 | Transformata Laplace | 179 | |
| A.2 | Program sursă ANSYS (limbaj parametric APDL) pentru calculul forței dezvoltate de electromagnetul 2 tip plonjor, întrefier $\delta = 0,5$ mm, formularea PMV-EM | 181 | |
| A.3 | Program sursă FEMM (limbaj parametric LUA) pentru calculul reactanțelor de scurtcircuit ale autotransformatorului de putere multi-înfășurări 400/400/80 MVA, încercarea de scurtcircuit primar-secundar, priza plus, formularea PMV-EM | 189 | |
| A.4 | Program sursă ANSYS (limbaj parametric APDL) pentru calculul reactanțelor de scurtcircuit ale autotransformatorului de putere multi-înfășurări 400/400/80 MVA, încercarea de scurtcircuit primar-secundar, priza plus, formularea PMV-EM | 195 | |

Lista abrevierilor

- AN** – soluția analitică;
- ANSYS** – program de modelare 2-D și 3-D cu metoda elementelor finite;
- APLD** – ANSYS Parameter Design Language, limbaj parametric utilizat de programul ANSYS;
- ATP-EMTP** – Alternative Transients Program - Electromagnetic Transients Program, pachet de programe de modelare a componentelor sistemelor electroenergetice;
- EN** – elemente nodale;
- EM** – elemente muchie;
- FEMM** – Finite Element Method Magnetics, program de modelare 2-D cu metoda elementelor finite;
- FLUX** – program de modelare 2-D și 3-D cu metoda elementelor finite;
- IPTM** – aplicație realizată în programul DELPHI pentru determinarea inductanței interne a unui electromagnet tip plonjor;
- LUA** – limbaj parametric utilizat de programul FEMM;
- MAPCF** – metoda aproximării cu puteri a condițiilor de frontieră;
- MCME** – metoda curenților de magnetizare echivalenți;
- MDF** – metoda diferențelor finite;
- MEF** – metoda elementelor finite;
- MEFr** – metoda elementelor de frontieră;
- MLV** – metoda lucrului virtual;
- MLVC** – metoda lucrului virtual Coulomb;
- MSE** – metoda surselor echivalente;
- MSME** – metoda sarcinilor magnetice echivalente;
- MVF** – metoda volumelor finite;
- MTC** – metoda transformărilor conforme;
- MTM** – metoda tensorului lui Maxwell;
- NUM** – soluția numerică;
- PES** – potențialul electric scalar;
- PMS** – potențialul magnetic scalar;
- PMSd** – potențialul magnetic scalar diferență;
- PMSg** – potențialul magnetic scalar generalizat;
- PMSm** – potențialul magnetic scalar de muchie;
- PMSr** – potențialul magnetic scalar redus;
- PMS_t** – potențialul magnetic scalar total;
- PMV** – potențialul magnetic vector;
- QUICKFIELD** – program de modelare 2-D cu metoda elementelor finite;
- SC** – modulul Schwartz-Christoffel din programul MATLAB (transformări conforme numerice);
- TPTCEL** – teoria parametrilor tranzitorii ai circuitelor electrice liniare;
- TVF** – teorema valorilor finale;
- TVI** – teorema valorilor inițiale;
- 2-D** – bidimensional;
- 3-D** – tridimensional.

INTRODUCERE

Lucrarea aduce contribuții în modelarea numerică a câmpurilor electrice și magnetice care se stabilesc în echipamente electrice sau accesorii ale lor în regimuri normale de funcționare precum și în regimuri tranzitorii intempestive sau controlate.

Instrumentul de bază utilizat în toate simulările numerice este metoda elementelor finite (MEF) pentru care autorul a făcut cercetări amănunțite atât din punct de vedere teoretic, urmărind varietatea de formulări dezvoltate de-a lungul timpului, cât și din punct de vedere aplicativ, deprinzând abilități de utilizare a unor programe specializate, comerciale sau necomerciale, în care metoda este implementată: QUICKFIELD, FEMM, ANSYS, FLUX.

Teza urmărește validarea numerică a unor formule analitice deduse în ipoteze aproximative și calculul numeric al unor mărimi electrice sau magnetice locale sau integrale obținute experimental. În unele cazuri au fost propuse soluții mixte analitic-numerice.

Varietatea de formulări ale MEF aplicate problemelor concrete și tehnicile de extragere a unor mărimi locale sau integrale din soluția numerică de câmp au condus la obținerea paralelă de rezultate ceea ce a permis un studiu comparativ între formulări sau tehnici privind resursele numerice solicitate și timpul de soluționare a problemelor, scoțând în evidență eficacitatea unora dintre ele.

Teza este structurată în șapte capitole, începând cu descrierea principală a MEF în formularea proiectivă și variațională (CAP. 1). Deoarece metoda a vizat aplicații în regimul magnetostatic, plecând de la particularizarea ecuațiilor câmpului electromagnetic pentru acest regim, au fost prezentate diverse formulări ale sale, susținute de o bogată revistă de literatură de specialitate.

În continuare sunt prezentate două aplicații ale MEF 2-D și 3-D, pentru calculul inductanței electromagneților tip plonjor (CAP. 2), respectiv a forței magnetice dezvoltate de aceste echipamente (CAP. 3). Descrierea tehnicilor de determinare a forței totale din soluția de câmp se bucură de o atenție aparte, concentrând concluzii importante desprinse din lucrări publicate în ultimele decenii.

Fenomenul de dispersie în circuitele magnetice a fost studiat în cazul unui autotransformator de putere multi-înfășurări cu reglaj sub sarcină, pentru care s-au creat modele numerice 2-D și 3-D ce au permis calcularea cu bună precizie a reactanțelor de scurtcircuit (CAP. 4). S-au căutat soluții de optimizare a simulărilor numerice în 3-D în sensul reducerii timpului de soluționare și creșterii preciziei. Studiul se încheie cu analiza comportamentului autotransformatorului la aplicarea de supratensiuni atmosferice utilizând programele FEMM și ATP-EMTP, urmărindu-se nivelurile supratensiunilor pe prizele înfășurării de reglaj.

Capitolele 5 și 6 vizează fenomenele tranzitorii ce au loc într-un sistem de bare masive dreptunghiulare paralele supuse aplicării de semnale de tip treaptă și rampă, de curent și tensiune. Rezultatele simulării numerice a pătrunderii câmpurilor electric și magnetic au fost comparate cu unele analitice și combinate cu acestea în scopul ameliorării efectelor unor ipoteze simplificatoare (CAP. 5). S-au determinat numeric parametrii tranzitorii ai sistemului de bare iar pe baza relațiilor analitice dintre aceștia, stabilite de teoria parametrilor tranzitorii ai circuitelor electrice liniare, s-au dedus unii în funcție de ceilalți, făcându-se observații cu privire la unele abateri constatate (CAP. 6).

În ultimul capitol (CAP. 7) sunt evidențiate contribuțiile originale și concluziile autorului, structurate pe capitolele în care apar, indicându-se perspectivele aplicării lor ulterioare.

Capitolul I

FORMULĂRI ALE METODEI ELEMENTELOR FINITE

1.2 Formularea proiectivă

MEF face parte din categoria metodelor de reprezentare a soluțiilor problemelor continue prin aproximări pe domenii discretizate [77]. Metoda generală de aproximare a funcției căutate $u(x)$ constă în reprezentarea ei prin *proiecția* într-un subspațiu de dimensiune finită, a cărui bază este definită de $N+1$ funcții de bază (de proiecție, de formă) $\Phi_i(x)$:

$$u(x) \approx \sum_{i=0}^N q_i \Phi_i(x) \quad (1.3)$$

1.3 Formularea variațională

Numeroase probleme fizice admit metode de aproximare a soluțiilor pe baza minimizării unor funcționale ce corespund de obicei unui tip de energie. Aceste formulări se numesc *variaționale* [21], [52], [168].

1.4 Aproximarea funcțiilor necunoscute

Soluția aproximativă se caută sub forma unei combinații liniare de funcții de bază cunoscute [145], de obicei polinomiale, liniare sau pătratice, definite astfel încât să ia valori nenule numai în jurul anumitor puncte particulare (*puncte de interpolare*).

1.5 Formulări ale metodei elementelor finite în magnetostatică

Soluțiile problemelor de câmp se obțin în general cu ajutorul funcțiilor potențiale [3]. Pentru câmpul magnetic se face adesea uz de potențialul magnetic scalar (PMS) sau de potențialul magnetic vector (PMV).

1.5.1 MEF în formularea potențialului magnetic scalar (PMS)

PMS are mare importanță în rezolvarea problemelor de magnetostatică 3-D datorită costului numeric scăzut al calculului față de PMV care comportă trei componente și în plus nu întâmpină probleme de unicitate [52], [82], [114]. Se deosebesc diferite formulări (strategii) de obținere a soluției: formularea în *potențial magnetic scalar redus* (PMSr), formularea în *potențial magnetic scalar total* (PMSt), formularea în *potențial magnetic scalar diferență* (PMSd), formularea în *potențial magnetic scalar generalizat* (PMSg), formularea în *potențial magnetic scalar de muchie* (PMSm).

1.5.2 MEF în formularea potențialului magnetic vector (PMV)

PMV este utilizat aproape în toate problemele de câmp magnetic în care intervin densități de curent. Este foarte popular pentru aplicațiile 2-D sau axial-simetrice deoarece în aceste cazuri posedă doar o componentă, ortogonală pe planul de analiză. În 3-D, calculul se triplează și apar probleme privind unicitatea, ceea ce îl face mai puțin atractiv decât PMS.

1.5.3 MEF în formularea elementelor-muchie (EM)

Formulările clasice ale MEF asociază gradele de libertate cu nodurile rețelei de discretizare, utilizând *elemente nodale* (EN). Într-o altă abordare, gradele de libertate sunt asociate cu muchiile elementelor, urmărindu-se determinarea circulației câmpului de-a lungul acestora, bazându-se pe *elemente-muchie* (EM) [17]. În funcție de natura potențialului utilizat și de modul de asociere a gradelor de libertate, se deosebesc formulări particularizate: PMS-EN, PMS-EM, PMV-EN, PMV-EM.

Capitolul II

INDUCTANȚA UNUI ELECTROMAGNET TIP PLONJOR

2.1 Introducere

În lucrările [32], [33], [35] se dezvoltă o nouă *metodă numerică de aproximare cu puteri a condițiilor de frontieră* (MAPCF).

2.2 Metoda aproximării cu puteri a condițiilor de frontieră (MAPCF)

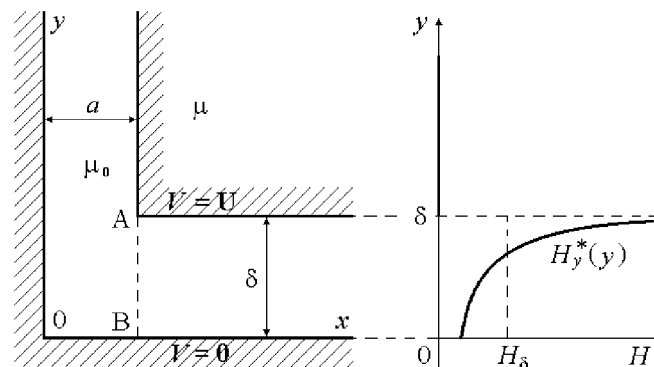


Fig. 2.1 - Ilustrarea metodei de aproximare cu puteri a condițiilor de frontieră

Analizând câmpul din vecinătatea vârfului A cu ajutorul transformărilor conforme, în lucrările [32] și [33] se propune aproximarea componentei tangențiale a câmpului magnetic de-a lungul frontierei AB, prin relația (2.1), care să respecte diferența de potențial U (electric sau magnetic) dintre punctele A și B:

$$H_y^*(y) = H_\delta \left[k_1 + \frac{k_2}{\left(1 - \frac{y}{\delta}\right)^\alpha} \right], \quad H_\delta = \frac{U}{\delta}, \quad \alpha < 1, \quad \int_0^\delta H_y^*(y) dy = U, \quad k_1 + k_2 = \frac{H_y^*(0)}{H_\delta} = u_0 \quad (2.1)$$

$$u_0 = 0,831957 + 1,54394 \cdot 10^{-2} \left(\frac{\delta}{a}\right) - 0,175235 \left(\frac{\delta}{a}\right)^2 + 7,66579 \cdot 10^{-2} \left(\frac{\delta}{a}\right)^3 - 1,60908 \cdot 10^{-2} \left(\frac{\delta}{a}\right)^4 + 1,83817 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\delta}{a}\right)^5 - 1,09529 \cdot 10^{-4} \left(\frac{\delta}{a}\right)^6 + 2,66537 \cdot 10^{-6} \left(\frac{\delta}{a}\right)^7 \quad (2.5)$$

2.3 Utilizarea MAPCF la calculul inductanței unui electromagnet tip plonjor

În lucrarea [36] este dedusă o formulă pentru calculul inductanței interne a unui magnet tip plonjor, utilizând metoda aproximării cu puteri a condițiilor de frontieră în spațiul bidimensional. Formula propusă este dificil de aplicat din cauza funcției:

$$F(\alpha, z) = \int_0^1 \frac{\cos[z(1-t)]}{t^\alpha} dt; \quad \alpha \in (0; 1) \quad (2.8)$$

conținând o integrală improprie. În acest capitol este propusă o metodă ([40], [140]) pentru evaluarea acestei funcții utilizând programul MATHCAD [178] precum și o verificare numerică prin metoda elementelor finite (QUICKFIELD [179], [177] și FEMM [175]) a formulei inductanței din lucrarea [36].

2.3.2 Calculul inductanței interne a electromagnetului 1 tip plonjor

Geometria electromagnetului 1 tip plonjor pentru care se calculează inductanța este prezentată în figura 2.5. Inductanța internă raportată la unitatea de lungime (grosime) calculată analitic $L'_{\text{int_AN}}$, corespunzătoare fluxului magnetic din fereastra electromagnetului 1 (fig. 2.5) în acord cu [36], poate fi scrisă sub forma:

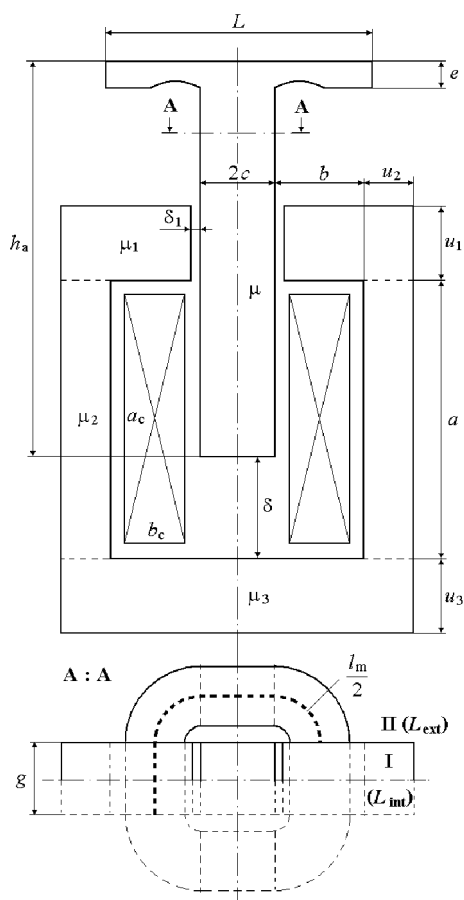


Fig. 2.5 - Geometria electromagnetului 1 tip plonjor

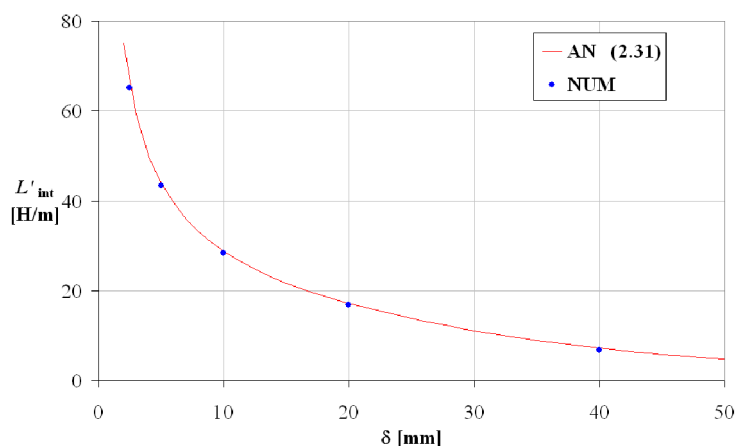


Fig. 2.6 - Inductanța internă pe unitatea de lungime, calculată analitic cu formula (2.31) (linia) și numeric cu QUICKFIELD, FEMM (punctele)

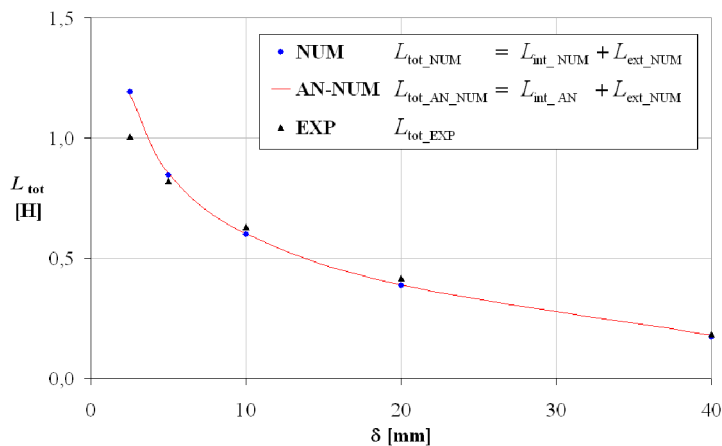


Fig. 2.7 - Rezultatele numerice (punctele), analitic-numerice (linia) și experimentale (triunghiurile) pentru inductanța totală

$$L'_{\text{int_AN}} = 4\mu_0 w^2 \left[G + \frac{c}{\delta_e} + \frac{a_1 a + b_1 b}{2\delta_e} - \frac{a_2 a^2 + b_2 b^2}{6ab} \right] \quad (2.31)$$

În formula (2.31) secțiunea transversală a bobinei este considerată de dimensiunile ferestrei: $a_c \approx a$, $b_c \approx b$.

2.3.3 Soluția numerică și verificarea experimentală

În scopul verificării numerice a expresiei analitice a inductanței interne $L'_{\text{int_AN}}$ (2.31) a electromagnetului 1 tip plonjor (fig. 2.5), dedusă cu ajutorul MAPCF, s-a utilizat MEF 2-D implementată în programele QUICKFIELD [179], [177] și FEMM [175].

Inductanța internă s-a evaluat pe baza energiei magnetice corespunzătoare domeniului interior (domeniul I, fig. 2.5). Analiza cu MEF-2D în formularea PMV s-a realizat în regim magnetostatic (1.42-1.45). În scopul estimării inductanței totale a electromagnetului 1 tip plonjor, analiza cu MEF 2-D s-a extins și la domeniul exterior miezului magnetic (domeniul II, fig. 2.5) corespunzător părților frontale ale bobinei.

$$L'_{\text{int_NUM}} = 2 \frac{2W'_{\text{m_int}}}{I^2}, \quad L'_{\text{ext_NUM}} = 2 \frac{2W'_{\text{m_ext}}}{I^2}, \quad I = J \frac{a_c b_c}{w} \quad (2.46)$$

Utilizând valorile inductanțelor internă și externă pe unitatea de lungime, calculate analitic sau numeric, s-a determinat inductanța totală a electromagnetului 1 tip plonjor, considerând pentru inductanța internă grosimea g a miezului iar pentru cea externă, diferența dintre semi-lungimea spirei medii ($l_m/2$) și grosimea g (fig. 2.5).

$$L_{\text{tot}} = L_{\text{int}} + L_{\text{ext}} = g L'_{\text{int}} + \left(\frac{l_m}{2} - g \right) L'_{\text{ext}} \quad (2.48)$$

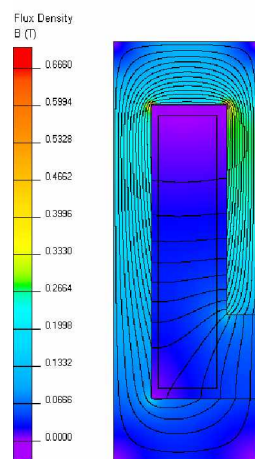


Fig. 2.8 - Distribuția inducției magnetice în domeniul interior pentru $\delta = 20$ mm (QUICKFIELD, 103.954 noduri)

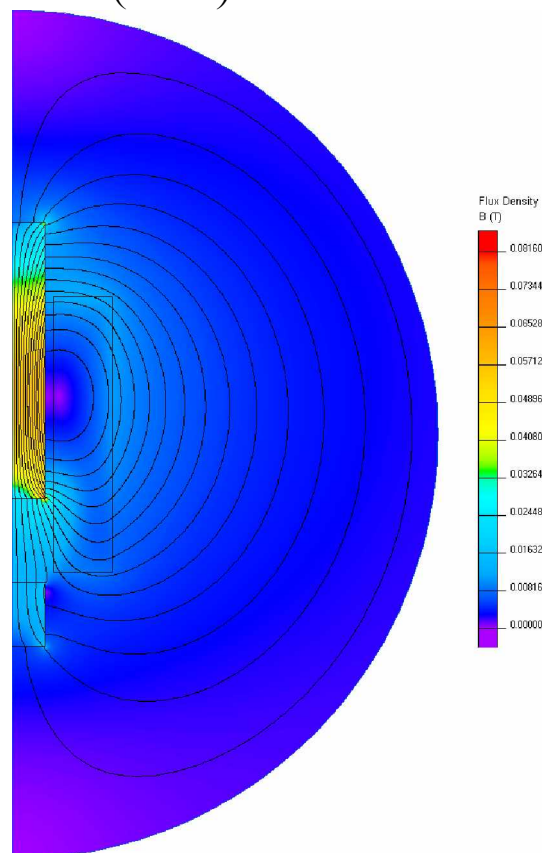


Fig. 2.9 - Distribuția inducției magnetice în domeniul exterior pentru $\delta = 20$ mm (QUICKFIELD, 56.217 noduri)

Capitolul III

CARACTERISTICA STATICĂ A UNUI ELECTROMAGNET TIP PLONJOR

3.2 Calculul numeric al forțelor electromagnetice

3.2.1 Metoda tensorului lui Maxwell (MTM)

Teoria câmpului electromagnetic [119] stabilește că forța F care acționează asupra unui corp plasat în câmp magnetic rezultă prin integrarea pe volumul corpului a densității de forță magnetică f de la nivelul unității de volum, presupusă cunoscută. O problemă echivalentă este considerarea unui sistem de forțe superficiale T_n , numit *tensiune magnetică (maxwelliană)*, care, acționând pe o suprafață S închisă în jurul corpului, produce aceeași rezultantă (fig. 3.1):

$$F = \int_{V_s} f dv = \oint_S T_n ds = \int_{V_s} \text{div}[T] dv, \quad T_n = (Bn)H - \frac{1}{2}(BH)n \quad (3.1)$$

T_n este o mărime vectorială asociată normalei exterioare de versor n , a suprafeței S , de către un tensor $[T]$, cu matricea componentelor simetrică de ordinul doi, numit *tensorul lui Maxwell (tensorul tensiunilor maxwelliene)*.

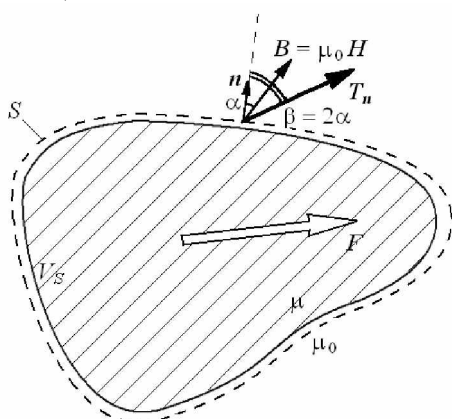


Fig. 3.1 - Tensiunea magnetică T_n

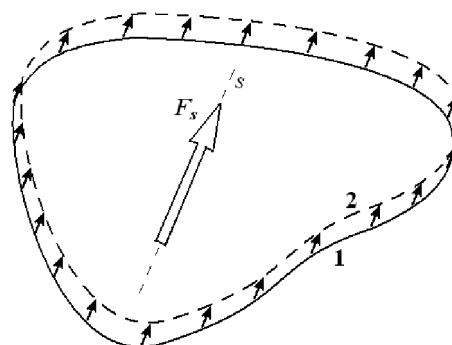


Fig. 3.2 - Forța magnetică F_s în direcția deplasării virtuale s

3.2.2 Metoda lucrului virtual (MLV)

Metoda lucrului virtual (MLV) derivă din teoremele acțiunilor ponderomotoare în câmp magnetic, având la bază bilanțul energetic al unui sistem electromagnetic. Teoria câmpului electromagnetic [119] stabilește expresiile forței generalizate F_s (forță propriu-zisă sau cuplu) în funcție de variația energiei magnetice (W_m) sau energiei magnetice complementare (co-energiei) (W_m^*) a sistemului în raport cu coordonata generalizată s (deplasare liniară sau unghiulară) în anumite condiții matematice impuse:

- flux magnetic Φ menținut constant la derivare:
$$F_s = - \left. \frac{\partial W_m}{\partial s} \right|_{\Phi=\text{ct.}} \quad (3.6)$$

- curent i menținut constant la derivare:
$$F_s = \left. \frac{\partial W_m^*}{\partial s} \right|_{i=\text{ct.}} \quad (3.7)$$

3.3 Determinarea numerică a caracteristicii statice a electromagnetului 2 tip plonjor și verificarea experimentală

Pentru determinarea numerică câmpului magnetic static s-a utilizat metoda elementelor finite (MEF) 3-D implementată în programul ANSYS, în formulările *potențial magnetic scalar* (PMS) și *potențial magnetic vector cu elemente muchie* (PMV-EM). În cazul formulării PMS forța electromagnetică s-a calculat prin metoda tensorului lui Maxwell (MTM) și metoda lucrului virtual (MLV) iar în cazul formulării PMV-EM, prin MLV [61].

Pentru automatizarea calculului numeric s-a renunțat la clasicul lucru cu meniuri, adoptându-se alternativa realizării de fișiere de comenzi utilizând limbajul parametric APDL (*ANSYS Parameter Design Language*) ce însoțește programul ANSYS.

Forța electromagnetică a fost măsurată utilizând o marcă tensometrică [61], [64] (fig. 3.7) dar și procedee simple [51] (fig. 3.8) la solenații din intervalul $\theta = 345,0-575,0$ A.

Acest studiu scoate în evidență superioritatea tehnicii lucrului virtual față de integrarea tensiunilor maxwelliene pentru calculul forțelor electromagnetice din soluția de câmp obținută cu metoda elementelor finite.

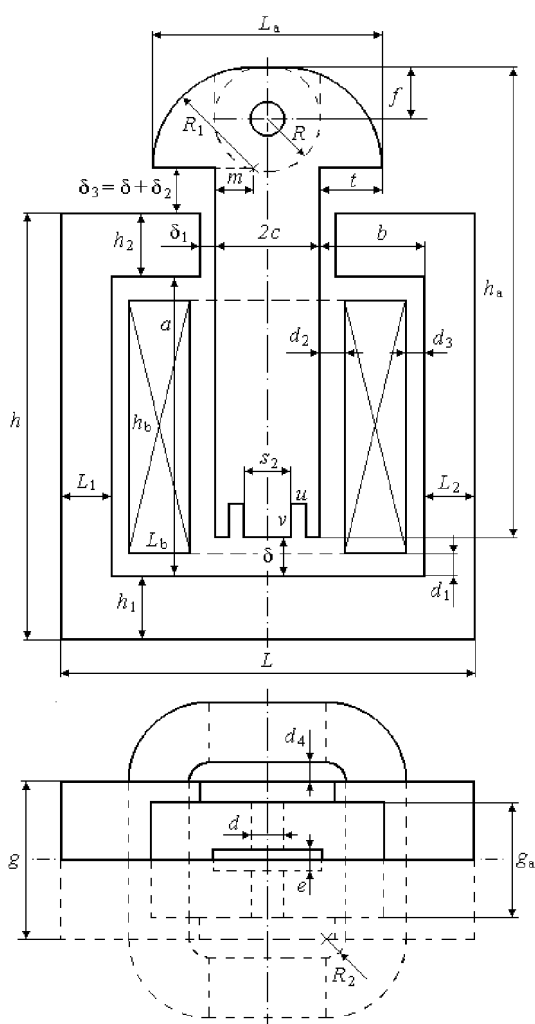


Fig. 3.6 - Geometria electromagnetului 2 tip plonjor

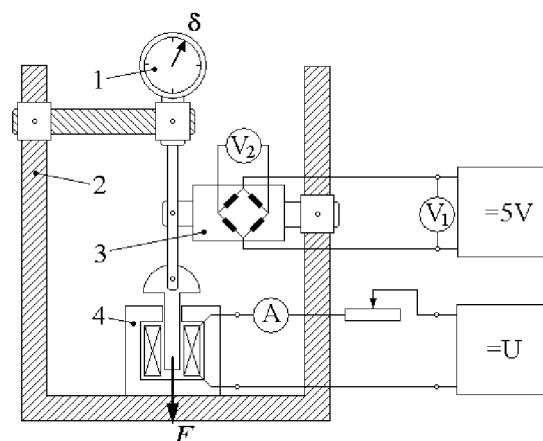


Fig. 3.7 - Schema de măsură a forței magnetice prin metoda tensometrică

- 1 - micrometru;
- 2 - cadru suport;
- 3 - marcă tensometrică;
- 4 - electromagnet;
- 5 - greutate adițională.

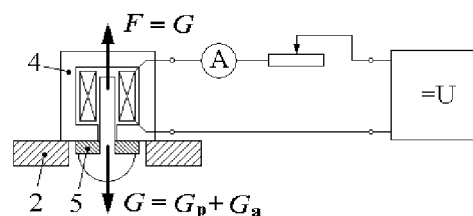


Fig. 3.8 - Schema de măsură a forței magnetice prin echilibrarea cu forța de greutate

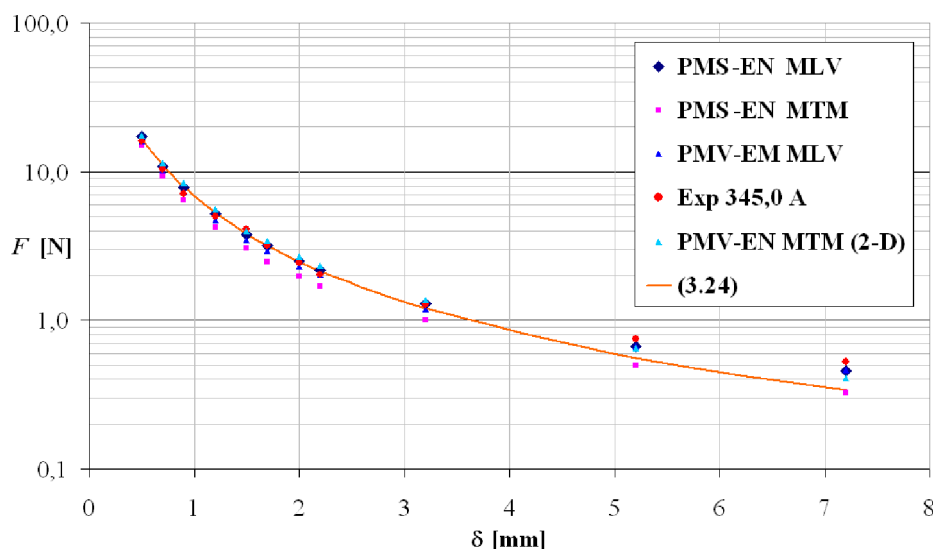


Fig. 3.11 - Caracteristicile statice numerice și experimentale forță - întrefier pentru $\theta = 345,0$ A

3.4 Determinarea teoretică a caracteristicii statice a electromagnetului 2 tip plonjor

În paralel cu investigațiile numerice privind evaluarea solicitărilor mecanice, s-au dezvoltat și studii analitice ce oferă soluții suficient de exacte. Astfel, lucrarea [51] valorifică cercetări teoretice mai vechi privind calculul permeanțelor utilizând metoda transformărilor conforme [38], [37], [47], [50], oferind formule analitice 2-D simple și precise pentru calculul câmpului magnetic și al forței în dispozitive electromagnetice de diverse forme. Aceste formule s-au aplicat electromagnetului 2 tip plonjor (fig. 3.6), analizat de această dată în sistem 2-D [51].

Raportul k dintre permeanța λ_1 corespunzătoare întrefierului principal δ și permeanța λ_2 a întrefierului superior $\delta_3 = \delta + \delta_2$, se poate exprima [51]:

$$k = \frac{\lambda_1(\delta)}{\lambda_2(\delta)} \approx \frac{\frac{c}{\delta} + 0,88}{\frac{c}{\delta} + \frac{h_2}{\delta_1} + \frac{t}{\delta_3} + 1,76} \quad (3.17)$$

Permeanța echivalentă s-a calculat considerând o conexiune de reluctanțe de tip serie:

$$\lambda = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \quad (3.22)$$

Forța portantă a electromagnetului 2 tip plonjor a rezultat:

$$F(\delta) = \mu_0 \frac{\theta^2}{\left(1 + \lambda(\delta) \frac{L_{Fe}}{\mu_r c}\right)} g \lambda'(\delta) \quad (3.24)$$

Rezultatele sunt prezentate în figura 3.11, comparativ cu soluțiile numerice 3-D, la care s-a alăturat o soluție 2-D prin MEF în formularea PMV-EN cu MTM, constatându-se bune concordanțe pe toată plaja întrefierurilor analizate în raport cu celelalte metode.

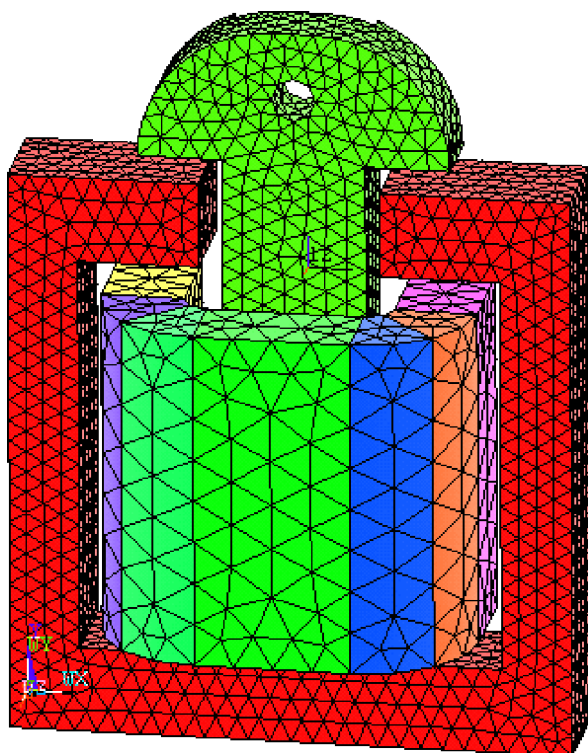


Fig. 3.15 - Perspectivă din față a modelului discretizat - formularea PMV-EM [61]

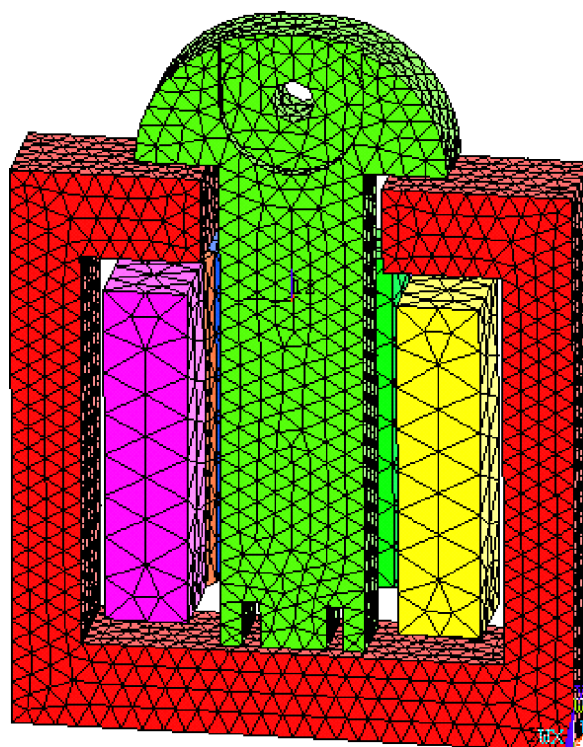
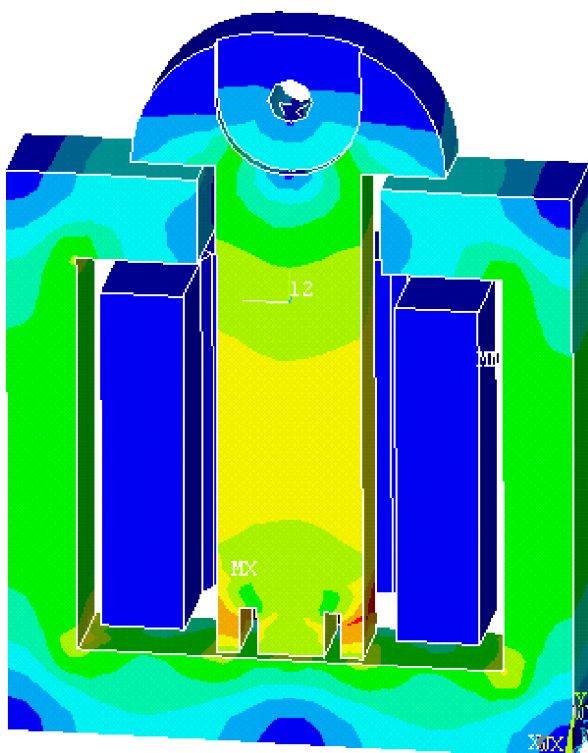
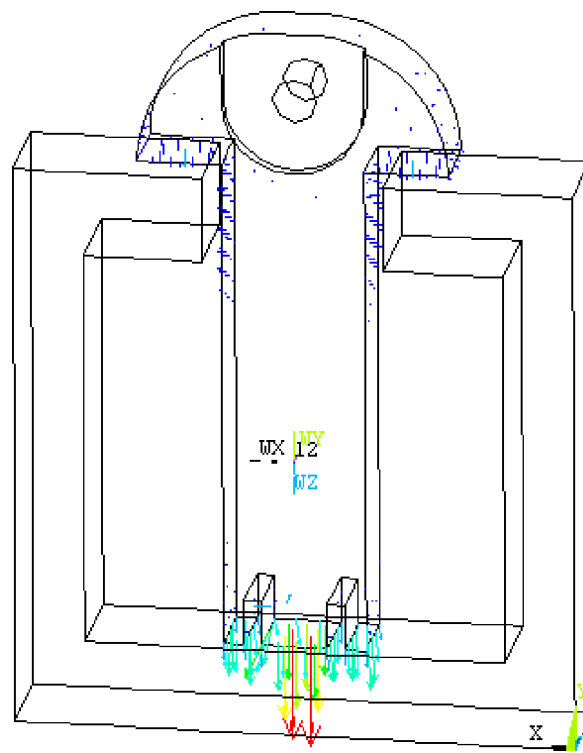


Fig. 3.16 - Perspectivă din planul de simetrie a modelului discretizat - formularea PMV-EM [61]



0,15 0,30 0,45 0,60 0,74 0,88 1,03 1,18 1,33 T

Fig. 3.17 - Inducția magnetică pe planul de simetrie și fețele laterale (0,5 mm, 575,0 A, formularea PMV-EM) [61]



0 0,1 0,2 0,3 0,4 0,5 0,6 0,7 0,8 0,9 N

Fig. 3.18 - Distribuția forței electromagnetice statice (0,5 mm, 575,0 A, formularea PMV-EM) [61]

Capitolul IV

DISPERSIA CÂMPULUI MAGNETIC ȘI MODELAREA SUPRATENSIUNILOR ÎNTR-UN AUTOTRANSFORMATOR DE PUTERE MULTI-ÎNFĂȘURĂRI

4.3 Tensiunea de scurtcircuit a autotransformatorului de putere multi-înfășurări

Autotransformatorul de putere multi-înfășurări trifazat supus investigației are puterile nominale corespunzătoare de 400/400/80 MVA pentru nivelurile de tensiune 400/231/22 kV.

Fie w_1 , w_2 , w_3 numerele de spire ale celor trei înfășurări principale ale autotransformatorului, primară, secundară și terțiară. Înfășurarea secundară este conectată la priza principală a înfășurării de reglaj așa încât tensiunea secundară de fază pentru prizele principală și marginale este:

$$U_{2f} = U_{2fN} \cdot \frac{w_2 + \alpha \frac{w_R}{2}}{w_2}, \quad U_{2fN} = \frac{U_{1N}}{\sqrt{3}} \frac{w_2}{w_1 + w_2} \quad (4.22)$$

unde U_{1N} este tensiunea primară de linie iar α este un coeficient subunitar ce depinde de poziția prizei înfășurării de reglaj, $-1 \leq \alpha \leq 1$, fiind nul pentru priza principală.

4.3.1 Perechea de înfășurări primar-secundar

Pentru determinarea parametrilor de scurtcircuit ai fiecărei perechi de înfășurări s-a adoptat metoda evaluării energiei magnetice. Pentru perechea formată din înfășurarea primară și secundară, energia câmpului magnetic poate fi calculată pentru o valoare arbitrară de linie a curentului primar I_{1e} , de obicei apropiată de valoarea curentului nominal primar I_{1N} .

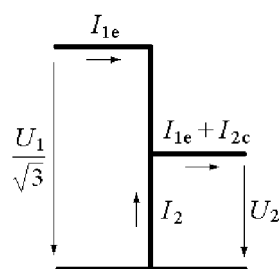


Fig. 4.4 - Schema monofazată simplificată a autotransformatorului

În cazul conexiunii stea, curentul de fază va fi același cu cel de linie (fig. 4.4) iar curenții prizelor secundare corespunzător (I_{2c}) rezultă din egalitatea solenațiilor primară și secundară:

$$I_{2c} = I_{1ef} \cdot \frac{w_1}{w_2 + \alpha \frac{w_R}{2}}, \quad I_{1ef} = I_{1e} \approx I_{1N} \quad (4.23)$$

Dacă W_{12} desemnează energia medie a câmpului magnetic pe fază, produsă de curenții I_{1e} și I_{2c} , reactanța de scurtcircuit raportată la înfășurarea primară X_{k12} se poate exprima în valori absolute sau în procente din impedanța nominală echivalentă a primarului Z_{1N} , astfel:

$$X_{k12} = \omega \cdot \frac{2W_{12}}{I_{1e}^2} [\Omega], \quad X_{k12\%} = 100 \cdot \frac{X_{k12}}{Z_{1N}} [\%], \quad Z_{1N} = \frac{U_{1N}}{\sqrt{3} I_{1N}} \quad (4.25)$$

4.4 Evaluarea numerică a energiei câmpului magnetic și a reactanțelor de scurtcircuit cu ajutorul programului FEMM

4.4.1 Modelul 2-D și condițiile pe frontiere

În fereastra autotransformatorului (fig. 4.5) s-au considerat margini feromagnetice cu componentă tangențială nulă a câmpului magnetic. Pentru partea frontală a bobinelor, marginea verticală se poate considera ca linie de potențial magnetic nul ($A = 0$). Pentru studiul aproximării ($A = 0$) pentru axa de simetrie (a - b) s-a procedat la o analiză în regim armonic la frecvență industrială.

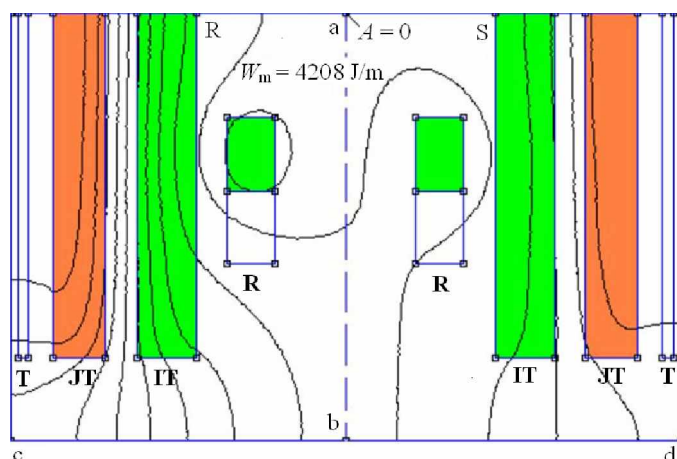


Fig. 4.5 - Distribuția câmpului magnetic în fereastra autotransformatorului cu 2 faze vecine, la priza minus pentru $i_R = \max$

| Faza | R | S |
|----------------------------|---------|------------------|
| J_1 [A/mm ²] | 0,799 | - 0,400 - j0,692 |
| J_2 [A/mm ²] | - 1,198 | 0,599 + j1,038 |
| J_R [A/mm ²] | 1,392 | - 0,696 - j1,206 |

Tab. 4.1 - Densitățile de curent corespunzătoare fazelor R și S la priza minus pentru $i_R = \max$

Analiza arată că aproximarea ($A = 0$) poate fi suficient de bine aplicată pentru axa de simetrie (a - b) a ferestrei autotransformatorului (fig. 4.5). În cazul când curentul în faza T își atinge maximum, curenții în fazele R și S au valori egale și distribuția câmpului este complet simetrică.

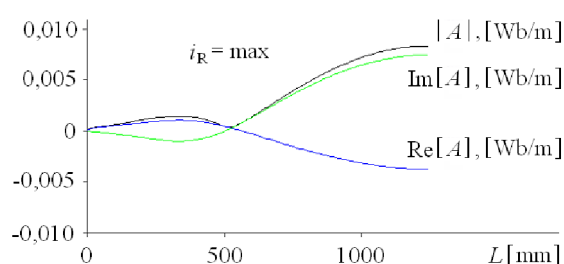


Fig. 4.6 - Distribuția potențialului magnetic vector de-a lungul axei de simetrie (a - b) a ferestrei autotransformatorului, la priza minus pentru $i_R = \max$

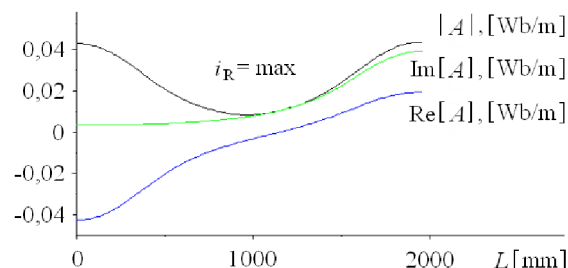


Fig. 4.7 - Distribuția potențialului magnetic vector de-a lungul marginii de jos (c - d) a ferestrei autotransformatorului, la priza minus pentru $i_R = \max$

După cum se observă în figurile 4.6 și 4.7, cea mai mică valoare a modulului potențialului se obține de-a lungul axei (a - b). Introducerea acestei frontiere oferă avantajul aplicării modelului cilindric și al reducerii de două ori a numărului de noduri.

4.4.2 Rezultatele numerice 2-D ale încercărilor de scurtcircuit

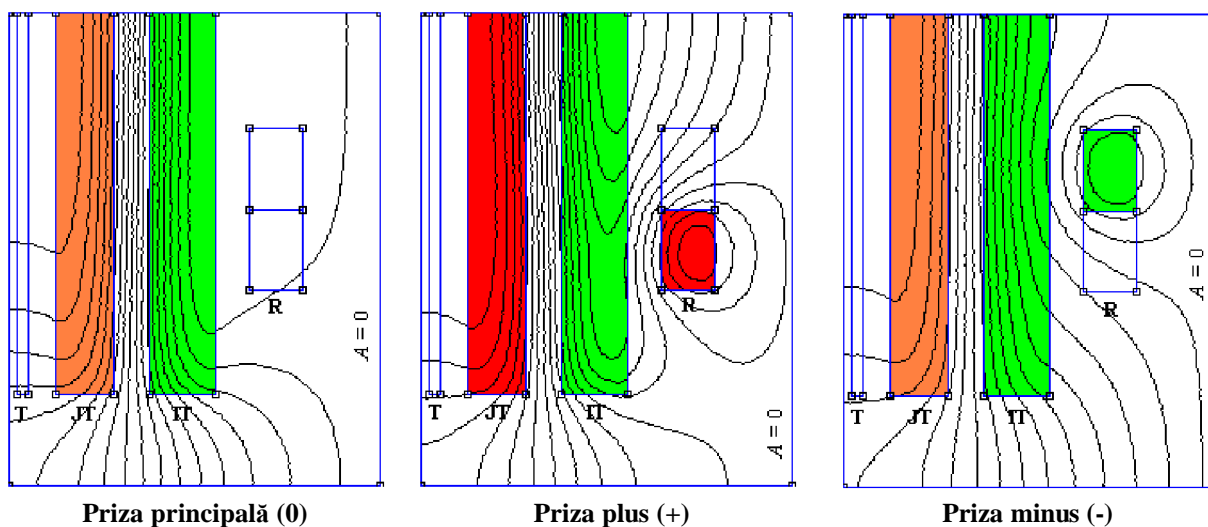


Fig. 4.11 - Distribuția câmpului magnetic în jumătatea inferioară a ferestrei autotransformatorului pentru încercarea de scurtcircuit a perechii primar-secundar

4.5 Evaluarea numerică a energiei câmpului magnetic și a reactanțelor de scurtcircuit cu ajutorul programului ANSYS

Analiza câmpului magnetic în autotransformator a continuat în lucrările [65], [67] utilizând MEF 3-D implementată în programul ANSYS. S-au folosit trei formulări în regim magnetostatic, PMV-EM [65], PMV-EN) [67] și în PMS [67].

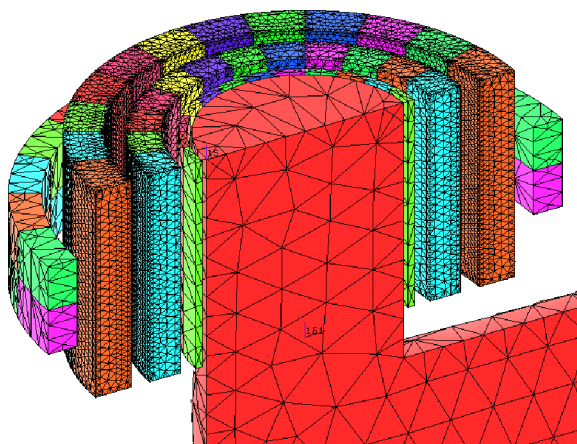


Fig. 4.14 - Perspectiva modelului 3-D cu rețeaua de discretizare asociată

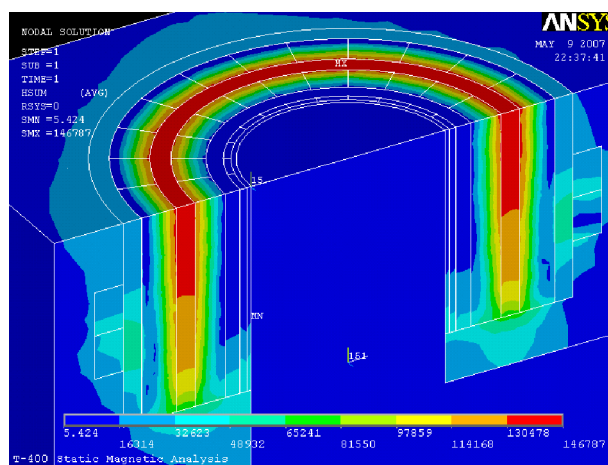


Fig. 4.15 - Distribuția 3-D a câmpului magnetic, formularea PMV-EM pentru încercarea de scurtcircuit a perechii primar-secundar, priza plus

| Perechea | Priza | Exp | X_k [Ω] | | | | X_k [%] | | | |
|----------|-------|-------|--------------------|--------|--------|--------|-----------|--------|--------|--------|
| | | | 2D | | 3D | | 2D | | 3D | |
| | | | PMV-EN | PMS-EN | PMV-EM | PMV-EN | PMV-EN | PMS-EN | PMV-EM | PMV-EN |
| 1-2 | 0 | 40,41 | 41,03 | 37,79 | 40,76 | 38,48 | 10,26 | 9,45 | 10,19 | 9,62 |
| | + | 29,56 | 28,87 | 27,64 | 29,11 | 27,35 | 7,22 | 6,91 | 7,28 | 6,84 |
| | - | 82,68 | 82,84 | 75,25 | 80,70 | 75,19 | 20,71 | 18,81 | 20,17 | 18,80 |

Tab. 4.7 - Reactanțele de scurtcircuit corespunzătoare încercărilor de scurtcircuit pentru perechea primar-secundar

4.5.3 Optimizarea simulărilor 3-D prin gestiunea memoriei

Gestiunea memoriei are implicații directe asupra timpului de soluționare (t_s). Atunci când complexitatea modelului o cere, sistemul de operare suplimentează memoria internă (fizică) a calculatorului cu memorie adițională, alocată din memoria virtuală, localizată pe hard-disc. Acest lucru afectează puternic performanțele de viteză ale algoritmului de rezolvare ceea ce recomandă alocarea doar a unui minim necesar de memorie adițională [3].

| Memorie fizică 1,5 GB Frecvență microprocesor 1,83 GHz | Memorie adițională nulă | | | Capacitate maximă calculator | | |
|--|-------------------------|---------|---------|------------------------------|----------|---------|
| | PMS-EN | PMV-EM | PMV-EN | PMS-EN | PMV-EM | PMV-EN |
| Noduri | 20.089 | 152.316 | 20.089 | 124.424 | 573.349 | 170.913 |
| Elemente | 109.294 | 109.294 | 109.294 | 723.016 | 421.501 | 999.954 |
| Ecuatii | 18.813 | 109.383 | 56.046 | 121.060 | 412.800 | 501.398 |
| Memorie adițională | 0 GB | 0 GB | 0 GB | 1,5-2 GB | 1,5-2 GB | 2-3 GB |
| t_{s_real} [s] | 183 | 238 | 164 | 29.487 | 11.586 | 55.583 |
| $t_{s_estimat}$ [s] - pentru memorie internă nelimitată | | | | 1.333 | 1.231 | 2.345 |
| Ordinul de creștere pentru t_{s_real} | | | | 22 x | 10 x | 24 x |

Tab. 4.9 - Timpul de soluționare (t_s) obținut pentru încercarea de scurtcircuit a perechii "1-2 plus"

O limitare a timpilor de lucru și o bună precizie s-au obținut prin alocarea diferențiată a memoriei adiționale de-a lungul fazelor de pre-procesare, procesare, post-procesare, prin intermediul unui fișier de configurare specific ANSYS. Rezultatele prezentate în tabelul 4.9 arată că utilizând memorie adițională în plaja (1,5-3,0) GB, timpul de lucru crește de (10-24) ori față de cazul unei memorii interne nelimitate.

4.6 Modelarea supratensiunilor atmosferice în autotransformatorul de putere multi-înfășurări

Atât la aplicarea impulsurilor de tensiune cât și a tensiunilor alternative de înaltă frecvență, la prizele de reglaj și la borne pot apărea supratensiuni importante, ale căror valori maxime pot depăși cu mult valorile maxime ale tensiunilor aplicate. Studiul modelului L-C pentru procesele ce au loc în înfășurările autotransformatorului în timpul încercării la impuls de tensiune atmosferică, oferă posibilitatea identificării influenței parametrilor constructivi asupra nivelului solicitărilor generate de aplicarea acestui impuls.

4.6.2 Inductanțele proprii și mutuale pentru înfășurarea terțiară aflată în scurtcircuit

Inductanțele proprii și mutuale au fost determinate utilizând câmpul magnetic în fereastra autotransformatorului în cazul scurtcircuitării și punerii la pământ a înfășurării terțiare. Calculul câmpului s-a făcut utilizând programul FEMM [175]. Inductanțele sunt date de către expresiile:

$$L_1 = \frac{\iiint_{S_1} A J_1 dV}{I_1^2}, \quad M_{12} = w'_2 \frac{\iiint_{S_2} A dV}{I_1} \quad (4.39)$$

unde A reprezintă potențialul magnetic vector, I_1 și j_1 , curentul și densitatea de curent în bobina 1 (IT) de secțiune transversală S_1 iar w'_2 și S_2 , densitatea de spire și secțiunea transversală a bobinei 2 (JT).

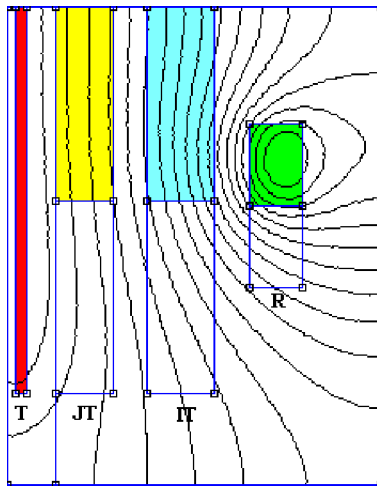


Fig. 4.18 - Distribuția câmpului magnetic pentru curent injectat în jumătatea superioară a înfășurării de reglaj

| | | |
|-----------------------------|-----------------------|-------------|
| Curentul | [A] | 290 |
| Solenanția | [kA] | 43,8 |
| Densitatea de curent | [A/mm ²] | 1,47; -1,37 |
| $\iiint_{R/2} A J dV$ | [J] | 10208 |
| $\iiint_{IT/2} A dV$ | [mWb·m ²] | 9,34 |
| $\iiint_{JT/2} A dV$ | [mWb·m ²] | 2,53 |
| $L_{R/2}$ | [mH] | 122 |
| $M_{R/2-IT/2}$ | [mH] | 137 |
| $M_{R/2-JT/2}$ | [mH] | 19 |

Tab. 4.12 - Parametrii calculați și valorile lor pentru curent injectat în jumătatea superioară a înfășurării de reglaj

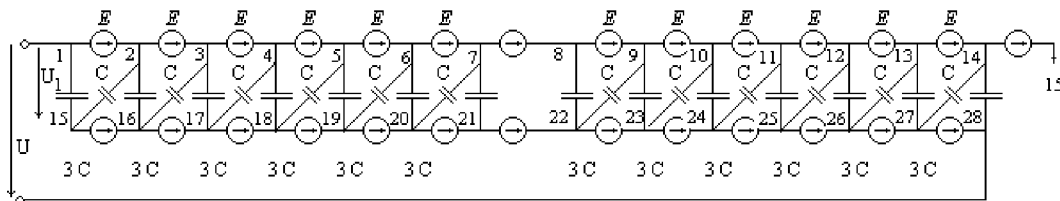


Fig.4.21 - Capacitățile conductoarelor pentru n = 14

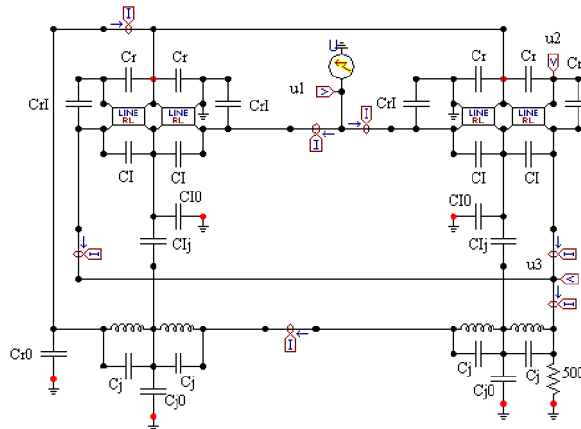


Fig. 4.22 - Schema simplificată a înfășurărilor autotransformatorului

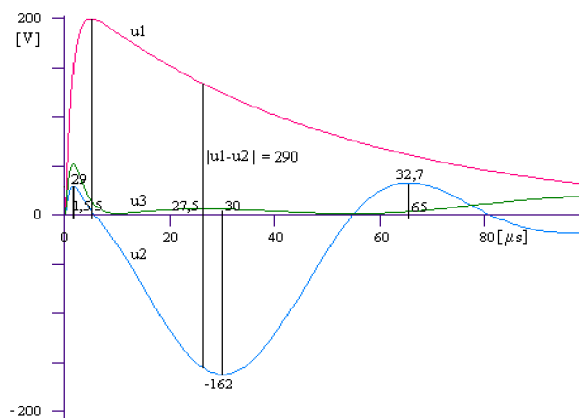


Fig. 4.23 - Supratensiunile pe înfășurarea de reglaj aflată în gol și în terminalul comun A₂ (punctele u₂, respectiv u₃ din schema simplificată)

Capitolul V

SIMULAREA NUMERICĂ A PĂTRUNDERII CÂMPURILOR ELECTRIC ȘI MAGNETIC ÎN BARE MASIVE DREPTUNGHIULARE

5.2 Evaluarea analitică a distribuției câmpului magnetic

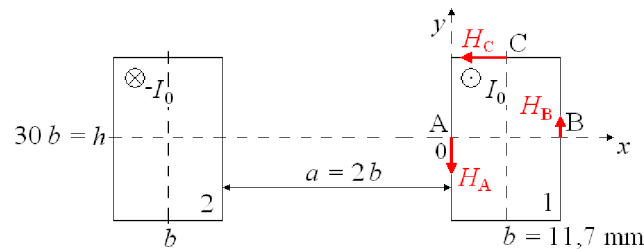


Fig. 5.2 - Sistem de două bare paralele parcurse de curent

5.2.2 Distribuția câmpurilor electric și magnetic la injectarea unei trepte de curent

La injectarea unei trepte de curent $i(t) = I_0 \cdot 1(t)$ unui sistem de două bare scurtcircuitate la capătul opus – situație echivalentă apariției unui scurtcircuit brusc sau întreruperii unui curent continuu – se obțin expresiile câmpurilor magnetic și electric în centrul barelor ($y = 0$):

$$H_y(\xi, \theta) = H_{yA} \left[\xi(1 + \eta) - 1 + \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{\eta \sin(k\pi\xi) - \sin(k\pi(1 - \xi))}{k} e^{-(k\pi)^2 \theta} \right], \quad \theta = \frac{t}{\tau} \quad (5.15)$$

$$E_z(\xi, \theta) = \frac{E_0}{1 + \eta} \left[1 + \eta + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k [\eta \cos(k\pi\xi) + \cos(k\pi(1 - \xi))] e^{-(k\pi)^2 \theta} \right] \quad (5.16)$$

$$\text{în care} \quad E_0 = \frac{I_0}{\sigma b h} \approx \frac{1 + \eta}{\sigma b} H_{yA} \quad (5.17)$$

este câmpul electric din conductor în regim stabilizat [41].

Dacă se aplică o treaptă de tensiune $u(t) = U_0 \cdot 1(t)$, expresiile câmpurilor magnetic și electric în centrul barelor ($y = 0$) pot fi scrise [41]:

$$H_y(\xi, \theta) = H_0 \left[\xi - \frac{1}{1 + \eta} - 2m \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\eta \sin(v_k \xi) - \sin(v_k(1 - \xi))}{v_k^2 ((m + 1) \sin(v_k) + v_k \cos(v_k))} e^{-v_k^2 \theta} \right] \quad (5.24)$$

$$E_z(\xi, \theta) = E_0 \left[1 - 2m \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\eta \cos(v_k \xi) + \cos(v_k(1 - \xi))}{v_k ((m + 1) \sin(v_k) + v_k \cos(v_k))} e^{-v_k^2 \theta} \right] \quad (5.25)$$

$$\text{unde } v_k \text{ sunt soluțiile ecuației [41]: } m(\eta + \cos v) = v \sin v \quad (5.26)$$

5.3 Simularea numerică a pătrunderii câmpurilor electric și magnetic în sistemul de bare masive dreptunghiulare

Pentru simularea numerică a procesului de pătrundere a câmpurilor electric și magnetic în sistemul de bare masive dreptunghiulare paralele formând o buclă de circuit, s-a utilizat metoda elementelor finite 2-D implementată în programele FLUX [172] și FEMM [175]. Procesul tranzitoriu propriu-zis și regimul stabilizat s-au investigat cu ajutorul FLUX 2D iar momentul inițial a fost analizat cu ajutorul FEMM. Efectul expulzării liniilor de câmp din domeniul conductor la momentul analizat s-a obținut printr-un artificiu constând în anularea aproximativă a permeabilității relative a acestuia.

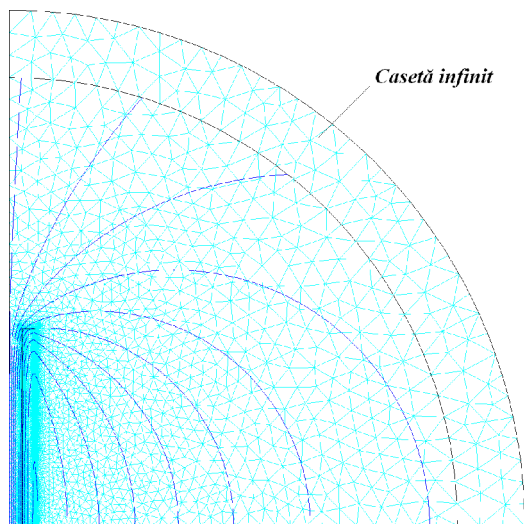


Fig. 5.3 - Domeniul studiat și rețeaua de discretizare în FLUX 2D (regimul stabilizat)

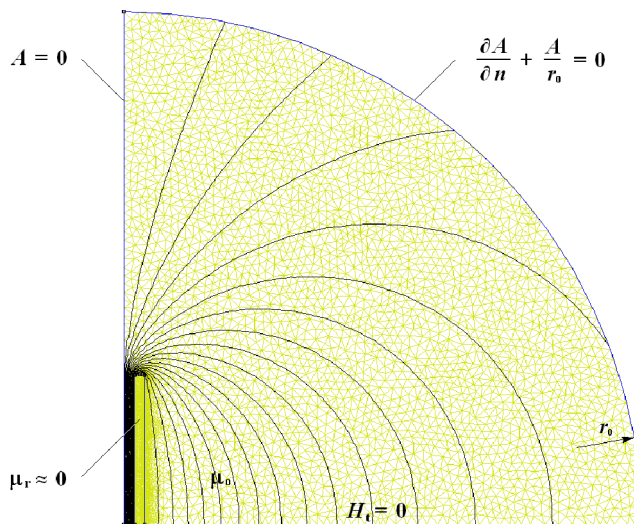


Fig. 5.5 - Domeniul studiat și rețeaua de discretizare în FEMM (momentul inițial)

5.3.4 Evaluarea numerică a câmpului magnetic exterior

Investigația cu FEMM pentru bare extrem de subțiri ($b/a = 0,01$) validează destul de bine rezultatele din lucrarea [48] în care raportul η la momentul inițial (η_0) este calculat cu ajutorul metodei transformărilor conforme (MTC), pentru configurația $b/a = 0$.

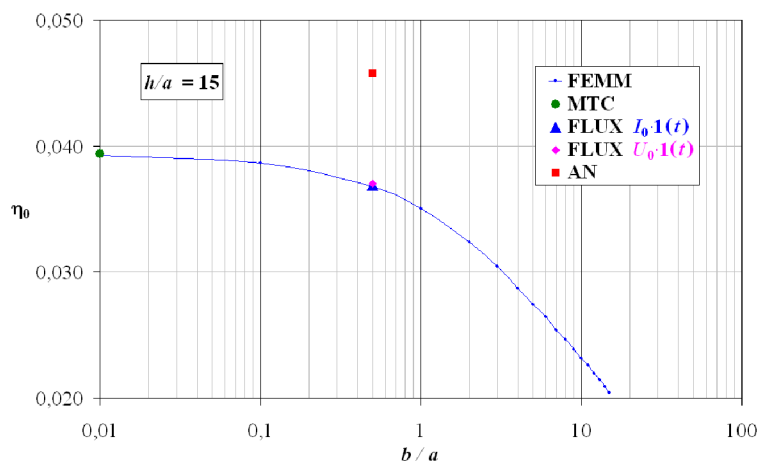


Fig. 5.6 - Raportul η_0 calculat prin diverse metode

Câmpul magnetic tranzitoriu depinde în mod esențial de câmpul inițial pe suprafața conductoarelor. În lucrarea [49] se continuă analiza acestui câmp începută în [48] la aplicarea unei trepte de curent sistemului de bare din fig. 5.2. Pentru formulele exacte obținute în [48] pentru bare de grosimi infinit mici sunt propuse aproximări simple în care intervine coeficientul utilizat de Dwight pentru determinarea forțelor electrodinamice dintre bare (5.27), extinzând astfel domeniul de aplicabilitate la bare de grosimi mici:

$$\eta_0(x) = \left| \frac{H_{yB}}{H_{yA}} \right| = \frac{\frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg}\left(\frac{x}{2}\right)}{\frac{\pi}{2} + \operatorname{arctg}\left(\frac{x}{2}\right)}, \quad x = \frac{h+b}{a}, \quad b < h \quad (5.27)$$

Problema este soluționată și prin transformări conforme numerice, utilizând modulul Schwartz-Christoffel (SC) din programul MATLAB.

Similar cu raportul η al componentelor tangențiale ale câmpului magnetic de pe fețele laterale, se definește raportul η_b dintre componentele tangențiale din punctele C și A (fig. 5.2) pentru a cărei medie se propune formula:

$$\eta_{b \text{ med}}\left(\frac{b}{a}\right) = \left| \frac{H_{xC}}{H_{yA}} \right| = \frac{\pi - 4\operatorname{arctg}\left(\frac{b}{2a+b}\right)}{\pi + 4\operatorname{arctg}\left(\frac{h}{2a+3b}\right)} \cdot \left[1 + \frac{h}{100a} + \frac{b}{a} \left(0,03 + \frac{h}{2000a} \right) \right] \quad (5.29)$$

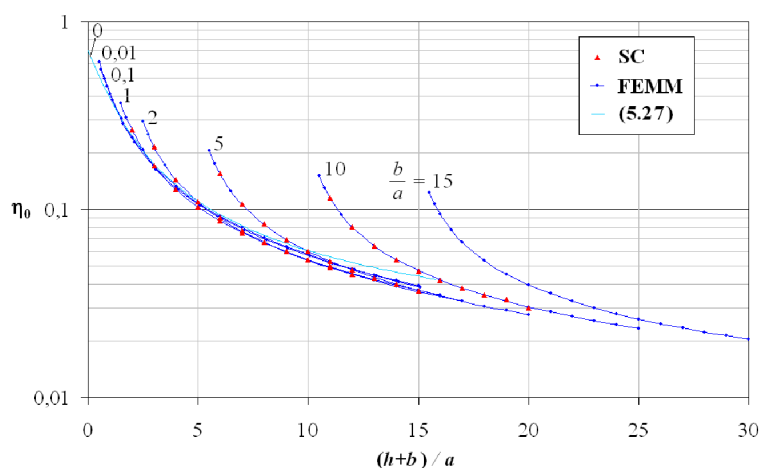


Fig. 5.11 - Influența geometriei sistemului de bare $((h+b)/a, b/a)$ asupra raportului η_0 - rezultate numerice (SC, FEMM) și analitice (5.27)

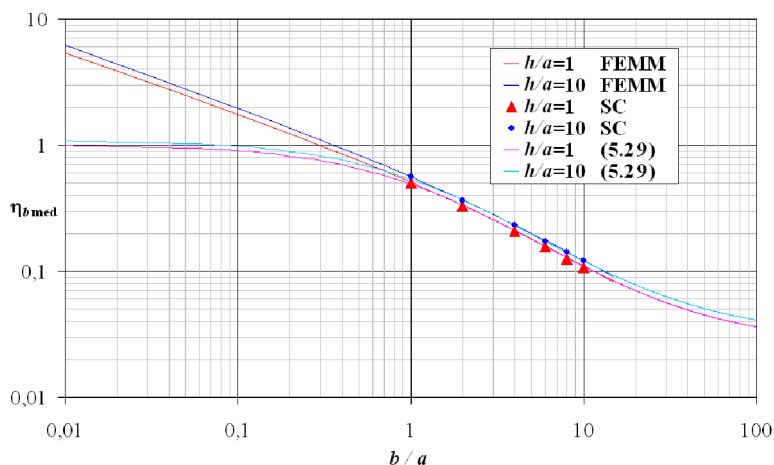


Fig. 5.14 - Influența geometriei sistemului de bare $(h/a, b/a)$ asupra raportului η_b - rezultate numerice (SC, FEMM) și analitice (5.29) -

5.3.5 Evaluarea numerică a distribuției câmpurilor electric și magnetic la injectarea unei trepte de curent

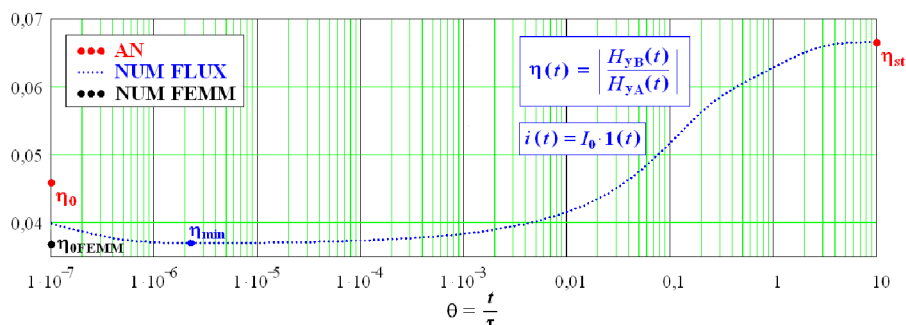


Fig. 5.15 - Evoluția raportului η de-a lungul procesului tranzitoriu la injectarea unei trepte de curent

În lucrarea [41] componenta tangențială a câmpului magnetic și componenta longitudinală a câmpului electric au fost calculate analitic pe baza ecuațiilor (5.22), (5.23) utilizând aceeași valoare a raportului η_{st} pentru toate momentele analizate. În această lucrare se propune o soluție mixtă analitic-numerică (fig. 5.17 și 5.19), bazându-se pe aceleași ecuații însă utilizând un η variabil, rezultat din simularea numerică în FLUX 2D (fig. 5.15).

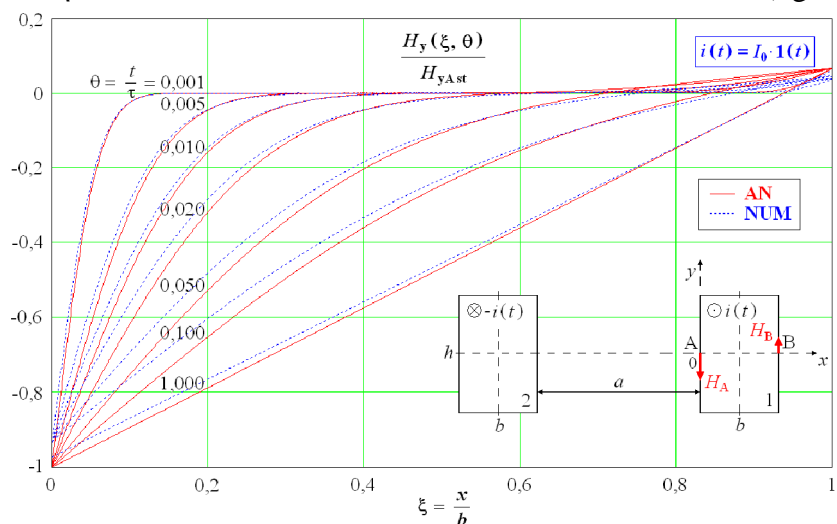


Fig. 5.16 - Rezultatele numerice și analitice pentru câmpul magnetic tranzitoriu în conductorul 1 la injectarea trepte de curent, pentru $h/b = 30$ și $a/b = 2$

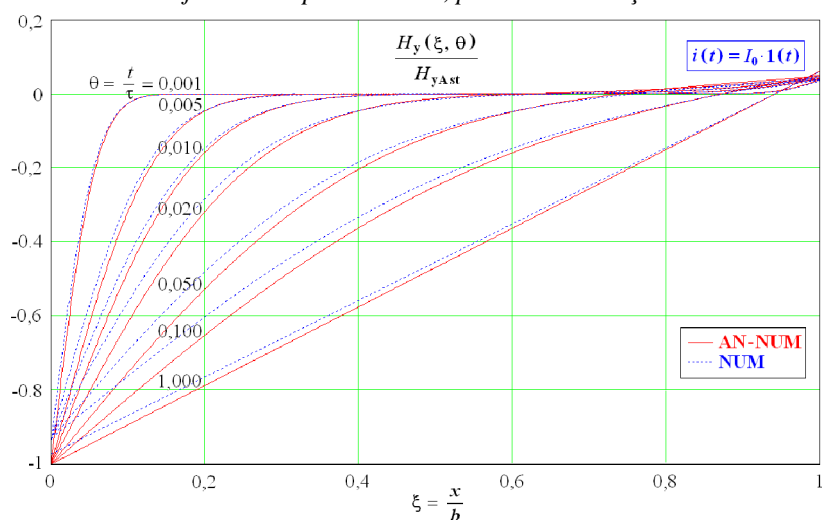


Fig. 5.17 - Rezultatele numerice și analitic-numerică pentru câmpul magnetic tranzitoriu în conductorul 1 la injectarea trepte de curent, pentru $h/b = 30$ și $a/b = 2$

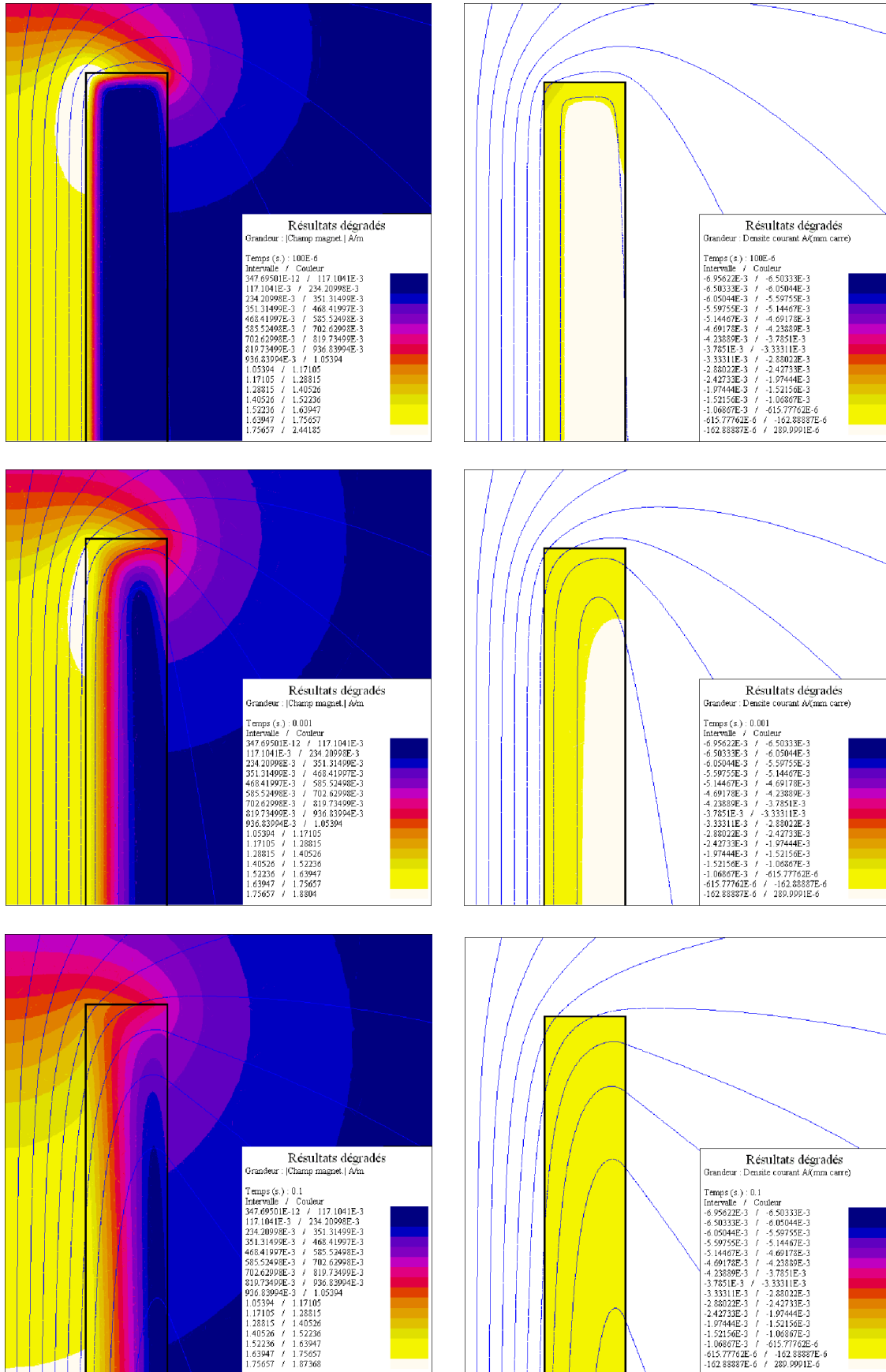


Fig. 5.29 - Distribuția câmpului magnetic (stânga) și a densității de curent (dreapta) pentru $\theta = 10^{-2}$, $\theta = 10^{-1}$, $\theta = 10$, la curent treaptă (FLUX 2D)

Capitolul VI

DETERMINAREA NUMERICĂ A PARAMETRILOR TRANZITORII AI UNUI SISTEM DE BARE MASIVE DREPTUNGHIULARE

6.1 Parametrii tranzitorii ai circuitelor electrice liniare

6.1.4 Parametrii tranzitorii ai elementelor de circuit nefiliforme și cu pierderi suplimentare

6.1.4.4 Relațiile integrale dintre mărimile instantanee ale curenților și tensiunilor

Ecuțiile integrale ale curentului, respectiv tensiunii ($\varepsilon > 0$, arbitrar de mic) pentru elementele de circuit *nefiliforme* și *cu pierderi suplimentare* sunt:

$$u(t) = l(0_+) \frac{di}{dt} + \frac{d}{dt} \int_0^t r(t-\xi) i(\xi) d\xi + u_0(t) = r_0 i + l(0_+) \frac{di}{dt} + \frac{d}{dt} \int_0^{t-\varepsilon} \frac{dl(t-\xi)}{dt} i(\xi) d\xi + u_0(t) \quad (6.70)$$

$$i(t) = c(0_+) \frac{du}{dt} + \frac{d}{dt} \int_0^t g(t-\xi) u(\xi) d\xi + i_0(t) = g_0 u + c(0_+) \frac{du}{dt} + \frac{d}{dt} \int_0^{t-\varepsilon} \frac{dc(t-\xi)}{dt} u(\xi) d\xi + i_0(t) \quad (6.71)$$

6.1.4.5 Determinarea experimentală a parametrilor tranzitorii

La injectarea unui *curent treaptă unitate* $i(t) = 1(t)$, respectiv la aplicarea unei *tensiuni treaptă unitate* $u(t) = 1(t)$, relațiile (6.70), (6.71) devin :

$$u(t) = l(0_+) \delta(t) + r(t) = r_0 \cdot 1(t) + \frac{dl(t)}{dt}, \quad \int_{0-\varepsilon}^t u(t) dt = r_0 t + l(t) \quad (6.80)$$

$$i(t) = c(0_+) \delta(t) + g(t) = g_0 \cdot 1(t) + \frac{dc(t)}{dt}, \quad \int_{0-\varepsilon}^t i(t) dt = g_0 t + c(t) \quad (6.81)$$

La injectarea unui *curent rampă* $i(t) = t \cdot 1(t)$, respectiv la aplicarea unei *tensiuni rampă* $u(t) = t \cdot 1(t)$, relațiile (6.70), (6.71) devin :

$$u(t) = l(0_+) \cdot 1(t) + \int_{0-\varepsilon}^t r(t) dt = r_0 \cdot t + l(t), \quad \frac{du(t)}{dt} = l(0_+) \cdot \delta(t) + r(t) \quad (6.84)$$

$$i(t) = c(0_+) \cdot 1(t) + \int_{0-\varepsilon}^t g(t) dt = g_0 \cdot t + c(t), \quad \frac{di(t)}{dt} = c(0_+) \cdot \delta(t) + g(t) \quad (6.85)$$

Determinarea rezistenței și conductanței tranzitorii se poate face în condiții experimentale comode la aplicarea semnalelor treaptă, când, pentru un element capacitiv ($l(0_+) = 0$), respectiv inductiv ($c(0_+) = 0$), acești parametri se identifică cu semnalele aplicate:

$$r(t) = u(t) - l(0_+) \delta(t) \Big|_{i(t)=1(t)} = u(t) \Big|_{i(t)=1(t), t>0} \quad (6.92)$$

$$g(t) = i(t) - c(0_+) \delta(t) \Big|_{u(t)=1(t)} = i(t) \Big|_{u(t)=1(t), t>0} \quad (6.93)$$

6.2 Utilizarea programului FLUX în determinarea parametrilor tranzitorii ai sistemului de bare masive dreptunghiulare

6.2.2 Determinarea rezistenței și inductivității tranzitorii la injectarea unui curent treaptă

La injectarea unui curent treaptă $i(t) = I_0 \cdot 1(t)$, pentru $t \geq 0$, relația (6.80) [140] stabilește legătura între parametrii rezistență tranzitorie și inductanță tranzitorie:

$$u(t) = I_0 [l(0_+) \delta(t) + r(t)] = I_0 \left[r_0 \cdot 1(t) + \frac{dl(t)}{dt} \right], \quad t \geq 0 \quad (6.99)$$

Utilizând direct valoarea numerică a tensiunii la curent treaptă, $u_{\text{crt_treaptă_NUM}}(t)$, din prima egalitate și pentru $t > 0$, rezultă rezistența tranzitorie la curent treaptă, pe baza tensiunii $r_{\text{crt_treaptă_U}}(t)$.

$$r_{\text{crt_treaptă_U}}(t) = \frac{u_{\text{crt_treaptă_NUM}}(t)}{I_0} \Big|_{t > 0} \quad (6.100)$$

A doua egalitate din (6.99) sugerează o altă cale de a obține rezistența tranzitorie utilizând valoarea numerică a inductivității tranzitorii la curent treaptă $l_{\text{crt_treaptă_NUM}}(t)$ oferite de FLUX (inductivitate totală). Rezultatul a fost numit sugestiv rezistență tranzitorie la curent treaptă, pe baza inductivității $r_{\text{crt_treaptă_L}}(t)$.

$$r_{\text{crt_treaptă_L}}(t) = r_0 + \frac{dl_{\text{crt_treaptă_NUM}}(t)}{dt} \quad (6.101)$$

Reciproc, din a doua egalitate se poate deduce aproximativ inductanța tranzitorie din rezistența tranzitorie, utilizând valoarea numerică a inductivității în regim static L_{st} pentru limita la infinit L_{∞} și valoarea $r_{\text{crt_treaptă_U}}(t)$ pentru rezistența tranzitorie $r(t)$:

$$l(t) = L_{\infty} - \int_t^{\infty} (r(t) - r_0) dt \approx L_{\text{st}} - \int_t^{10 \cdot \tau} (r_{\text{crt_treaptă_U}}(t) - r_0) dt = l_{\text{crt_treaptă_R}}(t) \quad (6.103)$$

Rezultatul a fost denumit generic inductivitatea tranzitorie la curent treaptă, pe baza rezistenței $l_{\text{crt_treaptă_R}}(t)$.

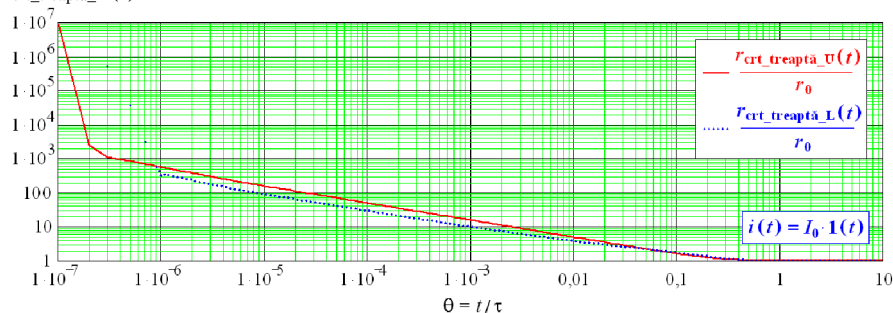


Fig. 6.8 - Rezistența tranzitorie la curent treaptă: linie continuă (6.100), linie punctată (6.101)

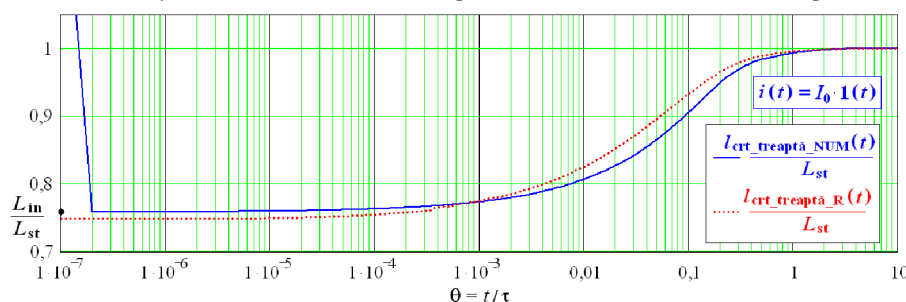


Fig. 6.9 - Inductivitatea tranzitorie la curent treaptă: linie continuă (FLUX), linie punctată (6.103), inductivitatea inițială: punct (6.109)

Capitolul VII

CONTRIBUȚII ORIGINALE ȘI CONCLUZII

Contribuțiile originale ale autorului în modelarea câmpurilor și a fenomenelor tranzitorii în echipamente electrice sunt structurate pe capitolele în care s-au evidențiat.

În **capitolul al II-lea** se propune verificarea numerică și experimentală a *metodei aproximării cu puteri a condițiilor de frontieră* (MAPCF) dezvoltată în [32], [33], [35] în cazul evaluării inductanței totale a unui electromagnet tip plonjor (fig. 2.5). Contribuțiile aduse de autor în această verificare sunt următoarele :

- Pe baza MAPCF, în lucrarea [36], în ipoteza ocupării de către bobină a întregii ferestre a electromagnetului, a fost dedusă o expresie analitică a inductanței interne pe unitatea de lungime $L'_{\text{int_AN}}$ (2.31) (domeniul I, corespunzător miezului magnetic de grosime g , fig. 2.5) pentru cazul 2-D, care este dificil de aplicat deoarece conține o integrală improprie $F(\alpha, z)$ (2.21). Autorul propune calculul acestei integrale cu ajutorul programului MATHCAD [178];

- Pentru evaluarea inductanței totale L_{tot} a electromagnetului, s-au luat în considerație două componente: inductanța internă L_{int} (domeniul I, fig. 2.5) obținută prin multiplicarea inductanței interne pe unitatea de lungime L'_{int} cu grosimea g a miezului magnetic și inductanța externă L_{ext} (domeniul II, exterior miezului magnetic, corespunzător părților frontale ale bobinei, fig. 2.5) obținută prin multiplicarea inductanței externe pe unitatea de lungime L'_{ext} cu diferența dintre semi-lungimea spirei medii ($l_m / 2$) și grosimea g (fig. 2.5).

- Cele două componente s-au evaluat numeric pe baza energiei magnetice înmagazinate în domeniile corespunzătoare, determinată în regim magnetostatic cu MEF implementată în programele QUICKFIELD [179], [177] și FEMM [175]. Eroarea relativă medie a soluției numerice față de soluția analitică pentru inductanța internă pe unitatea de lungime L'_{int} este de 2,47% valoare ce atestă valabilitatea formulei analitice (2.31) pentru calculul inductanței interne.

- Evaluarea analitică și numerică a inductanței interne și evaluarea numerică a celei externe cu ajutorul celor două programe de analiză cu MEF 2-D au condus la două soluții pentru inductanța totală, una pur numerică ce prezintă abateri medii foarte mici față de datele experimentale (0,78%) și una analitic-numerică, cu erori de 1,67%. Precizia rezultatelor în care intervine formula analitică (2.31) confirmă încă o dată exactitatea acesteia.

- S-au justificat unele erori ale rezultatelor obținute făcându-se recomandări utile. Diferențele mari între datele experimentale și cele calculate pentru întrefieruri mici pot fi explicate prin forma ușor deformată a plonjorului care nu este cu fețe plate ca în figura 2.5. O altă sursă posibilă de erori poate fi geometria simplificată în formă de „I” a plonjorului, față de forma reală în „T” (fig. 2.5). Acuratețea soluțiilor analitice și numerice se poate îmbunătăți prin renunțarea la ipotezele geometrice simplificatoare, iar în ceea ce privește doar soluția numerică, prin abordarea 3-D, pentru descrierea exactă a configurației geometrice.

Capitolul al III-lea prezintă rezultatele unor investigații teoretice și experimentale asupra unui electromagnet tip plonjor în scopul testării eficacității unor metode analitice și numerice de calcul al forței dezvoltate.

Cercetări teoretice mai vechi [38], [37], [47], [50] utilizând *metoda transformărilor conforme* (MTC) au furnizat formule analitice simple și precise pentru calculul 2-D al permeanțelor, utile pentru obținerea unei expresii analitice pentru forța portantă (3.19).

Autorul a creat modele numerice 3-D ale unui electromagnet tip plonjor (fig. 3.6) și a realizat determinări experimentale în scopul validării rezultatelor proprii și a celor analitice. Contribuțiile aduse în aceste investigații sunt prezentate în continuare:

- Metoda numerică folosită pentru analiză este *metoda elementelor finite* (MEF) care se pretează cel mai bine la tehnicile de determinare a forței. S-au adoptat două formulări ale MEF 3-D în regim magnetostatic: *formularea în potențial magnetic scalar cu elemente nodale* (PMS-EN) și *formularea în potențial magnetic vector cu elemente-muchie* (PMV-EM). Au fost alese două tehnici clasice pentru obținerea forței totale din soluția de câmp: *metoda tensorului lui Maxwell* (MTM) și *metoda lucrului virtual* (MLV). Formulările adoptate în conjuncție cu una sau cu ambele tehnici, implementate în programul ANSYS [171] au condus la obținerea a trei soluții numerice pentru caracteristica statică a electromagnetului tip plonjor: PMS-EN MTM, PMS-EN MLV și PMV-EM MLV.

- Pentru automatizarea calculului, s-a renunțat la clasicul lucru cu meniuri, adoptându-se alternativa realizării de fișiere de comenzi utilizând limbajul parametric APDL ce însoțește programul ANSYS, iar pentru reducerea timpului de execuție a acestor fișiere s-a adoptat *modul batch*, care minimizează resursele hardware solicitate.

- Forța electromagnetică a fost măsurată experimental pentru o anumită plajă a întrefierului, utilizând metoda tensometrică pentru întrefieruri mai mici dar și procedee simple de măsurare a greutateii plonjorului, aplicate la întrefieruri mai mari, când efectul de saturație este nesemnificativ.

- Obținerea paralelă de rezultate (fig. 3.9) a permis compararea metodelor pe baza aprecierii valorilor măsurate. Din analiza erorilor relative medii față de datele experimentale reiese că cea mai precisă soluție este dată de formularea PMS MLV, cu 0,08%, urmată de formularea PMV-EM MLV cu 6,17%, cea mai puțin precisă fiind obținută cu formularea PMS MTM, cu 20,27% (fig. 3.10). Acest studiu scoate în evidență superioritatea tehnicii lucrului virtual față de integrarea tensiunilor maxwelliene pentru calculul forțelor electromagnetice din soluția de câmp obținută cu MEF 3-D. S-a încercat și utilizarea *formulării în potențial magnetic vector cu elemente nodale* (PMV-EN) în conjuncție cu ambele tehnici MTM și MLV, însă rezultatele s-au dovedit eronate. Cu toate acestea, o implementare 2-D a acesteia în programul FEMM [175] în conjuncție cu MTM concordă foarte bine cu datele experimentale (fig. 3.9) (eroarea relativă medie de 4,00%). De asemenea, eroarea relativă medie față de măsurători a valorii forței obținută cu formula analitică (3.24) este de 3,89%, ceea ce constituie o validare a acesteia (fig. 3.9).

- Un alt criteriu de comparație între metode a fost convergența soluției față de numărul total de elemente finite utilizate și de talia elementelor din întrefier care au mare influența asupra preciziei forței. Rezultatele obținute arată o convergență mai rapidă a MLV față de MTM care necesită o rețea de discretizare mai fină.

În **capitolul al IV-lea** a fost studiat fenomenul de dispersie într-un autotransformator de putere trifazat, cu înfășurări primare, secundare, terțiare și de reglaj cu prize multiple, de 400/400/80 MVA, 400/231/22 kV, obținându-se modele numerice 2-D și 3-D.

A fost analizat și comportamentul autotransformatorului la aplicarea de supratensiuni atmosferice urmărindu-se nivelurile supratensiunilor pe prizele înfășurării de reglaj. Talia considerabilă a simulărilor numerice 3-D a determinat investigații pentru optimizarea acestora în sensul reducerii timpului de soluționare și creșterii preciziei, în limita resurselor hardware. Contribuțiile autorului în aceste studii sunt evidențiate în cele ce urmează:

- Deoarece tensiunea de scurtcircuit pentru prizele secundare ale înfășurării de reglaj nu se poate evalua utilizând formule simple, deduse în ipoteza unor linii de flux magnetic drepte, autorul a considerat spectrul real al câmpului magnetic, obținut prin MEF. Astfel, au fost obținute două modele numerice, un model 2-D cu ajutorul programului FEMM

[175] și unul 3-D cu ajutorul programului ANSYS [171], în ipoteza unui regim magnetic static ce aproximează destul de bine regimul de frecvență industrială, având în vedere secțiunile mici ale conductoarelor.

- Pentru obținerea modelului 2-D s-a făcut un studiu preliminar al condițiilor de frontieră care se impun. Pentru partea frontală a bobinelor, pe marginea verticală, ar trebui considerată o mică adâncime de pătrundere a câmpului datorită ecranului de aluminiu sau cupru al cuvei autotransformatorului. Însă, la frecvența industrială, câmpul magnetic determinat în aceste condiții este practic identic cu câmpul static corespunzător frecvenței nule iar marginea verticală frontală se poate considera ca linie de potențial magnetic nul ($A = 0$).

- Pentru celelalte margini s-a făcut o analiză cu FEMM în regim armonic de frecvență industrială, la două momente de timp decalate cu un sfert de perioadă, urmărindu-se valorile potențialului magnetic vector (PMV) de-a lungul liniei de simetrie a ferestrei autotransformatorului comparativ cu valorile acestuia pe marginea din partea de jos a ferestrei (fig. 4.5, 4.10). Rezultatele au arătat valori extrem de mici, (fig. 4.6-4.9) sugerând considerarea liniilor de simetrie ale ferestrelor ca linii de flux cu potențial magnetic nul.

- Ultima aproximație este de asemenea susținută de egalitatea energiilor câmpului magnetic pe unitatea de lungime, calculate la cele două momente de timp.

- O altă confirmare a rezultat din recalcularea energiei în condițiile aplicării aproximației pentru axa de simetrie, care s-a dovedit a fi numai cu 0,50 % mai mică.

- Considerarea liniilor de simetrie ale ferestrelor autotransformatorului ca linii de flux cu potențial magnetic nul, ca și liniile de flux din părțile frontale ale înfășurărilor, din vecinătatea cuvei ecranate, a permis utilizarea unui model cilindric, foarte economic din punct de vedere numeric. Soluția axial-simetrică FEMM în regim magnetostatic pentru reactanțele de scurtcircuit corespunzătoare prizelor centrale și marginale ale înfășurării de reglaj concordă cu datele experimentale cu erori mai mici de 3,00% (tab. 4.8).

- În 3-D, problema de câmp s-a rezolvat utilizând trei formulări ale MEF: PMV-EM, PMV-EN și PMS-EN implementate în ANSYS pentru regimul magnetostatic care au condus la rezultate ce se abat în medie cu 1,00%, 5,83%, respectiv 8,34% de la valorile experimentale. Cu toate ipotezele simplificatoare, soluția axial-simetrică 2-D în formularea PMV-EN, cu o eroare relativă medie de 0,11%, ocupă primul loc ca acuratețe (tab. 4.8).

- Și în acest caz, pentru automatizarea calculului, s-a adoptat lucrul cu fișiere de comenzi utilizând limbajul parametric APDL.

- Utilizând pachetul de programe ATP-EMTP [173], [174] și FEMM a fost studiat comportamentul autotransformatorului de putere multi-înfășurări la aplicarea de supratensiuni atmosferice, considerându-se un model simplificat L-C pentru înfășurări. În condițiile înfășurării terțiare aflată în scurtcircuit, s-a urmărit nivelul supratensiunilor ce apar pe prizele înfășurării de reglaj aflată în gol.

- Inductanțele proprii și mutuale au fost determinate cu programul FEMM în abordare axial-simetrică, pentru înfășurarea terțiară aflată în scurtcircuit și pusă la pământ. S-au neglijat, inductanțele mutuale dintre înfășurarea de reglaj și înfășurarea de joasă tensiune, din cauza valorii relativ mici, accentuată de efectul de ecranare a înfășurării de înaltă tensiune, situată între ele. S-a neglijat, de asemenea, inductanța mutuală dintre înfășurările de înaltă și joasă tensiune. Caracterul distribuit al înfășurărilor a fost luat în considerare prin divizarea acestora în patru tronsoane (două tronsoane per fereastră). Lungimea caracteristică a elementelor grupate, necesare pentru analiză este de ordinul a 20 - 50 cm.

- Capacitățile s-au evaluat analitic, ținând cont de dispoziția conductoarelor adiacente și neglijând capacitățile dintre conductoarele situate în galeți diferiți.

- Rezultatele modelării indică ceva diferențe față de valorile măsurate în cadrul încercării de laborator (tab. 4.16), care pot fi puse pe seama ipotezelor simplificatoare și a modelării axial-simetrice.

- Schema simplificată din ATP-EMTP poate fi utilizată pentru a identifica influența parametrilor constructivi ai autotransformatorului la aplicarea supratensiunilor atmosferice de un anumit nivel și formă a impulsului.

- S-au căutat soluții de optimizare a simulărilor numerice 3-D de mare anvergură, în sensul reducerii timpului de soluționare și creșterii preciziei. Cunoscut fiind faptul că, la nevoie, sistemul de operare al calculatorului suplimentează memoria internă (fizică) cu memorie adițională alocată de pe hard-disc, ceea ce încetinește drastic rularea programului, autorul a preluat gestiunea memoriei de lucru a calculatorului prin intermediul unui fișier de configurare specific ANSYS. Astfel, a putut fi minimizată cantitatea de memorie adițională prin alocarea diferențiată a acesteia de-a lungul fazelor de pre-procesare, procesare și post-procesare.

- De asemenea, pe baza numărului de noduri utilizat de fiecare formulare, s-a putut evalua timpul de soluționare în ipoteza ideală a unei memorii interne nelimitate. Rezultatele prezentate în tabelul 4.9 arată că utilizând memorie adițională în plaja (1,5-3,0) GB, timpul de lucru crește de (10-24) ori față de cazul ideal.

- Multiplele simulări numerice de mare anvergură au confirmat faptul că soluțiile se obțin cu atât mai rapid cu cât nivelul de memorie internă a calculatorului este mai însemnat, ceea ce minimizează cantitatea de memoria adițională solicitată de pe hard-disc.

Capitolul al V-lea vizează fenomenele tranzitorii ce au loc într-un sistem de două bare masive dreptunghiulare paralele, la aplicarea de semnale treaptă de curent și tensiune. Problema câmpului magnetic tranzitoriu pentru cazul barelor înălțime infinită este rezolvată analitic complet [161], considerând un câmp magnetic nul pe fețele exterioare ale ambelor bare. Noi rezultate analitice [41] s-au obținut pentru bare de înălțime finită, dar suficient de mare, menținând ipoteza câmpului magnetic unidimensional în interiorul barelor, distribuit constant pe înălțime, dar considerând un câmp magnetic nenul pe fețele exterioare. Raportul η al câmpurilor din mijlocul celor două fețe ale barei înalte a fost, de asemenea, considerat constant.

Autorul a simulat numeric procesul de pătrundere a câmpurilor electric și magnetic în sistemul de bare (fig. 5.2) utilizând MEF 2-D. Rezultatele simulării au fost comparate cu cele analitice și combinate cu acestea în scopul ameliorării efectelor unor ipoteze simplificatoare. Contribuțiile în studiul acestui fenomen tranzitoriu sunt redată în continuare:

- Regimul tranzitoriu stabilit în sistemul două bare masive dreptunghiulare paralele foarte înalte ($h/b = 30$) (fig. 5.2), la aplicarea de semnale treaptă de curent și tensiune, s-a simulat cu ajutorul programelor FLUX 2-D [172] și FEMM [175]. Fiind o problemă cu frontieră deschisă, s-au utilizat facilitățile FLUX în acest sens, prin încadrarea domeniului sistemului de bare cu așa-numita *casetă infinit*, respectiv prin utilizarea de condiții de frontieră asimptotice disponibile în FEMM.

- Pentru creșterea preciziei, rețelele de discretizare spațială și temporală s-au îndesit în zonele în care mărimile prezintă variații mari, adică de-a lungul muchiilor barelor și mai ales în jurul vârfulurilor, respectiv spre începutul procesului tranzitoriu. O influență importantă o are și viteza de variație a dimensiunii elementelor în cadrul rețelei. Astfel, pasul de timp a fost majorat în trepte, menținându-se constant pe intervale mici de timp, urmărindu-se să nu aibă salturi mai mari de 2-2,5 ori la joncțiunea intervalelor omogene.

- S-a determinat numeric cu ajutorul FLUX evoluția de-a lungul procesului tranzitoriu a raportului η , la aplicarea de semnale treaptă de curent și tensiune. În ambele

cazuri s-a constatat o alură nemonotonă a curbelor în primele decade (fig. 5.15, 5.22), explicabilă prin rețeaua de discretizare temporală inevitabil grosieră pe aceste tronsoane.

- Pentru investigarea valorilor raportului η la momentul inițial absolut ($t = 0$) (η_0) s-au derulat simulări statice în programul FEMM. Efectul expulzării liniilor de câmp din domeniul conductor la acest moment s-a obținut printr-un artificiu constând în anularea aproximativă a permeabilității relative a acestuia.

- Simulările numerice FEMM la momentul $t = 0$ au condus la valori ale raportului η_0 foarte apropiate de minimul curbelor numerice obținute în FLUX ceea ce indică momentele din care simularea în regim tranzitoriu în FLUX poate căpăta credit.

- Investigația cu FEMM pentru bare extrem de subțiri ($b/a = 0,01$) (fig. 5.2) validează destul de bine rezultatele pentru η_0 obținute cu ajutorul metodei transformărilor conforme (MTC) [48], pentru configurația $b/a = 0$.

- Diferențe mari au fost constatate față de valorile analitice ale lui η_0 [41] (fig. 5.6, 5.15, 5.22) ceea ce indică faptul că ipotezele în care s-a dedus analitic raportul η la momentul $t = 0$ sunt destul de aproximative.

- În regim stabilizat, însă, simulările numerice conduc la aceleași rezultate ca și calculele analitice, probându-se o mare varietate de configurații geometrice (fig. 5.7, 5.8).

- Determinările analitice ale componentelor tangențiale și longitudinale ale câmpului magnetic, respectiv electric [41] s-au bazat pe utilizarea unui raport η constant, egal cu valoarea sa din regim stabilizat η_{st} . Chiar în această ipoteză, comparația dintre curbele numerice și cele analitice pentru diverse momente ale procesului tranzitoriu arată bune concordanțe, exceptând punctele de la extremitățile barelor (fig. 5.16, 5.18, 5.23, 5.25).

- Variațiile în timp ale câmpurilor magnetic și electric determinate numeric la periferia barei (punctele A și B, fig. 5.1) confirmă concordanțele cu rezultatele analitice, excepție făcând primele decade în care sunt vizibile erorile metodei numerice (fig. 5.20, 5.21, 5.27, 5.28).

- Autorul a propus o soluție mixtă analitic-numerică (fig. 5.17, 5.19, 5.24, 5.26) pe baza ecuațiilor analitice [41] în care s-a utilizat un raport η variabil, furnizat de simularea numerică în FLUX (fig. 5.15, 5.22).

- Simulările numerice au continuat în FEMM la momentul $t = 0$, pentru o mare varietate de configurații geometrice, validând rezultate obținute cu transformări conforme numerice [49], utilizând modulul Schwartz-Christoffel (SC) din programul MATLAB și noi formule analitice foarte simple ale raportului η_0 (5.27) și ale mediei sale η_{0med} (5.28) [49] pentru bare de grosimi mici, în care intervine coeficientul $(h+b)/a$ utilizat de Dwight pentru determinarea forțelor electrodinamice dintre bare.

- Media raportului η_b al componentelor tangențiale ale câmpurilor magnetice în punctele C și A (η_{bmed}) (fig. 5.2) a fost supusă aceluiași tip de investigații numerice. A fost validată atât evaluarea SC cât și expresia analitică (5.29) [49], remarcându-se dependența foarte slabă față de raportul h/a .

- Și în cazul programului FEMM, automatizarea calculului s-a obținut prin rularea de fișiere de comenzi (*scripturi*) realizate utilizând limbajul parametric LUA [176] atât pentru pre-procesare și procesare cât și pentru post-procesare, ceea ce nu elimină însă lucrul interactiv.

În **capitolul al VI-lea** s-au determinat numeric cu MEF 2-D parametrii tranzitorii ai sistemului de bare masive dreptunghiulare paralele foarte înalte ($h/b = 30$) (fig. 5.2), iar pe baza relațiilor analitice dintre aceștia, stabilite de *teoria parametrilor tranzitorii ai circuitelor electrice liniare* (TPTCEL) [140], s-au dedus unii în funcție de ceilalți, făcându-se observații cu privire la unele abateri constatate. Contribuțiile autorului în evaluarea parametrilor tranzitorii sunt menționate în continuare:

- Simulările cu ajutorul programului FLUX 2D descrise în capitolul al V-lea privind regimurile tranzitorii din sistemul de bare la aplicarea de semnale de tip treaptă sau rampă de curent și tensiune, au permis determinarea numerică a trei parametri tranzitorii: *rezistența tranzitorie*, dedusă direct din valoarea numerică a tensiunii aplicate (6.100), (6.105), *conductanța tranzitorie*, dedusă direct din valoarea numerică a curentului injectat (6.100), (6.105) și *inductivitatea tranzitorie*, oferită direct de FLUX, evaluată pe baza definiției clasice în care intervine fluxul magnetic total (6.96), (6.97), (6.98).

- Relațiile analitice de interdependență dintre parametri stabilite de TPTCEL [140] au permis calculul *inductivității tranzitorii* din rezistența tranzitorie (6.103), (6.107) în care intervine în plus inductivitatea în regim stabilizat (static) L_{st} precum și calculul *capacității tranzitorii* din conductanța tranzitorie, în care intervin capacitatea în regim stabilizat C_{st} (6.115) sau capacitatea inițială C_{in} (6.120).

- Determinarea capacității inițiale C_{in} s-a făcut în regimul particular al alimentării cu tensiune rampă, pentru care TPTCEL [140] furnizează o relație de calcul a acesteia în care intervine curentul și derivata lui în raport cu timpul (6.118), (6.117). Ținând cont că C_{in} este o mărime constantă, valoarea ei trebuie să rezulte aceeași, indiferent la ce moment de timp se face evaluarea ei. Autorul a propus pentru C_{in} o formulă (6.119) ce mediază cele 234 de valori corespunzătoare momentelor de timp ce descriu procesul tranzitoriu analizat ce acoperă zece decade.

- Capacitatea de regim stabilizat C_{st} s-a considerat egală cu valoarea capacității tranzitorii la aplicarea tensiunii rampă, calculată la ultimul moment de timp, corespunzător scurgerii a zece constante de timp.

- Inductivitatea de regim stabilizat L_{st} s-a evaluat în regim magnetostatic, verificându-se foarte bine cu valoarea numerică inductivității tranzitorii oferită direct de FLUX, calculată la ultimul moment de timp.

- Reciproc, tot pe baza formulelor analitice din TPTCEL [140], din valoarea numerică a inductivității tranzitorii oferită direct de FLUX (inductivitatea totală) s-a calculat rezistența tranzitorie (6.101), (6.105).

- După aceeași metodologie ca și în cazul C_{in} a fost determinată și inductivitatea inițială L_{in} în regimul particular al alimentării cu curent rampă, pentru care TPTCEL [140] furnizează o relație de calcul a acesteia în care intervine tensiunea și derivata ei în raport cu timpul (6.108), (6.105). Ținând cont că L_{in} este o mărime constantă, valoarea ei trebuie să rezulte aceeași, indiferent la ce moment de timp se face evaluarea ei. Autorul a propus pentru L_{in} o formulă (6.109) ce mediază cele 234 de valori corespunzătoare momentelor de timp ce descriu procesul tranzitoriu analizat. Valoarea L_{in} a putut fi validată deosebit de exact prin simularea statică FEMM (Cap. V).

- Comparațiile între rezultatele numerice și analitic-numerice ale parametrilor tranzitorii scot în evidență unele diferențe ce pot avea mai multe cauze. Astfel, simularea numerică la începutul regimului tranzitoriu este puternic afectată de rețeaua de discretizare temporală, inevitabil grosieră în primele decade. Erorile din decadele intermediare, pot fi puse pe seama modului distinct în care este definit parametrul *inductivitate tranzitorie*. Programul FLUX [172] evaluează acest parametru utilizând definiția clasică în care intervine fluxul total (6.96), (6.97), în timp ce TPTCEL [140] face apel la un flux echivalent, legat de inductivitate printr-un produs de convoluție (6.78). Alte surse de erori pot fi și aplicarea operatorilor de derivare asupra semnalelor numerice prelucrate prin interpolare. O finețe mai mare a rețelei de discretizare temporale ar putea îmbunătăți acuratețea rezultatelor.

- Caracteristicile de conductor masiv față de conductorul filiform ideal au fost evidențiate comparând evoluțiile mărimilor la borne la alimentarea cu tensiune și curent rampă.

- Autorul a realizat o animație grafică ce simulează pătrunderea câmpurilor electric și magnetic în sistemul de bare dreptunghiulare în cazul injectării unui curent treaptă.

REFERINȚE BIBLIOGRAFICE

- [1] Ahagon, A., *Comparison of various kinds of edge elements for electromagnetic field analysis*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 32, nr. 3, mai 1996, pag. 898-901;
- [2] Andea, P., *Electromagneții*, Editura Helicon, Timișoara, 1993;
- [3] ANSYS Release 9.0 Documentation, 2004;
- [4] Ardeleanu, M., *Metode de studiu al câmpurilor electrice și magnetice asociate cablurilor subterane*, Referat doctorat, Universitatea din Craiova, 2003;
- [5] Azzouz, Z.E., *Modélisation 3D d'un transformateur de puissances. Etude de son comportement à haute fréquence*, Teză de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, (LEG), 1992;
- [6] Bardi, I., *Nodal and edge element analysis of inhomogeneously loaded 3-D cavities*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 28, nr. 2, martie 1992, pag. 1142-1145;
- [7] Barré, O., Broche, P., Hecquet, M., *Experimental validation of magnetic and electric local force formulations associated to energy principle*, vol. 42, nr. 4, aprilie 2006, pag. 1475-1478;
- [8] Bateman, H., Erdelyi, A., *Higher Transcendental Function*, vol. 2, Mc. Graw-Hill, New York, 1953;
- [9] Benhama, A., Williamson, A.C., Reece, A.B.J., *Computation of electromagnetic forces from finite element field solutions*, Third International Conference on Computation in Electromagnetics, 10-12 aprilie, 1996, pag. 247-252;
- [10] Benhama, A., Williamson, A.C., Reece, A.B.J., *Force and torque computation from 2-D and 3-D finite element field solutions*, Electric Power Applications, IEE Proceedings, vol. 146, nr. 1, ianuarie 1999, pag. 25-31;
- [11] Benhama, A., Williamson, A.C., Reece, A.B.J., *Virtual work approach to the computation of magnetic force distribution from finite element field solution*, Electric Power Applications, IEE Proceedings, vol. 147, nr. 6, noiembrie 2000, pag. 437-442;
- [12] Berbente, C., Mitran, S., Zancu, S., *Metode numerice*, Editura Tehnică, București, 1997;
- [13] Binns, K.J., Lawrenson, P.J., *Analysis and computation of electric and magnetic field problems*, Pergamon Press, Oxford, 1963;
- [14] Biro, O., Preis, K., *On the use of the magnetic vector potential in the finite element analysis of three-dimensional eddy currents*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 25, nr. 4, iulie 1989, pag. 3145-3159;
- [15] Biro, O., Preis, K., Richter, K., *On the use of the magnetic vector potential in the nodal and edge finite element analysis of the 3-D magnetostatic problems*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 32, nr. 3, mai 1996, pag. 651-654;
- [16] Blache, F., *Modélisations électronique et électromagnétique d'un transformateur haute fréquence à circuit magnétique en fonte*, Teză de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, (LEG), 1995 ;
- [17] Bossavit, A., *A rationale for Edge-elements in 3-D fields computations*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 24, nr. 1, ianuarie 1988, pag. 74-79;
- [18] Burden, R.L., Faires, D.J., *Numerical Analyses - third edition*, PWS-KENT Publishing Company, Boston, 1985;
- [19] Carron, G., *Contribution à la modelisation des phenomenes magnetodynamiques en trois dimensions*, Teză de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, (LEG), 1990;
- [20] Champaney, L., *Méthodes d'Approximation de Solution pour les Problèmes de Physique*, curs, Université de Versailles St-Quentin en Yvelines, 2005;
- [21] Chari, M.V.K., Bedrosia, G., D'Angelo, J., Konrad, A., *Finite element application in electrical engineering*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 29, nr. 2, martie 1993, pag. 1306-1314;
- [22] Chen, S.X., Low, T.S., Mah, Y.A., Jabbar, M.A., *Super convergence theory and its application to precision force calculation*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 32, nr. 5, septembrie 1996, pag. 4275-4277;
- [23] Choi, H.S., Park, I.H., Lee, S.H., *Concept of virtual air gap and its applications for force calculation*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 42, nr. 4, aprilie 2006, pag. 663-666;
- [24] Choi, H.S., Lee, S.H., Park, I., *Implementation of virtual air-gap for Maxwell stress tensor*, 12th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation, iunie 2006, pag. 401-401;
- [25] Cira, O., *Lección de MathCad*, Editura Albastră, Cluj-Napoca, 2000;
- [26] Cividjian, G.A., Degeratu, P., Cernian, O., *The calculation of the dimensions for an electromagnet with T-armature*, Proceedings of the XIIIth Conference on Design automation, pag. 495-501, San Francisco, California, United States, 28-30 iunie, 1976;
- [27] Cividjian, G., Degeratu, P., Cernian, O., *Dimensionarea electromagneților cu armatură în T, (Dimensioning the T-armature electromagnets)*, The XIIth Technical Scientific Session of ICPE, ref. 152/G, pag. 3-20, 4-6 noiembrie, București, 1976;
- [28] Cividjian, G., Radulian, G., *Inductanța electromagneților cu armatură în T, (Inductance of the T-armature electromagnets)*, The XIIth Technical Scientific Session of ICPE, ref. 185/A, pag. 1-10, 4-6 noiembrie, București, 1976;
- [29] Cividjian, G.A., *Aparate electrice. Partea I*, Reprografia Universității din Craiova, 1979;

- [30] Cividjian, G.A., Popa, I., Leoveanu Maria, *Forța de atracție la electromagneții cu armatură în T (Force of T-armature electromagnets)*, National Conference on Electricity and Energy, CNEE '82, vol. 9, pag. 65-70, Timișoara, 17-18 septembrie, 1982;
- [31] Cividjian, G.A., Popa, I., Leoveanu, Maria, *Programs for the dimensioning of U, E and T - electromagnets*, The IVth National Conference on Electrical Drives, pag. 69-74, Craiova, 1984;
- [32] Cividjian, G.A., *Stepennaia aproksimatia granicinyh uslovii pri rescete polei razdeleniem peremennyh, (Power approximation of boundary conditions at field calculation by variables separation)*, The IIIrd International Symposium on Theoretical Electricity, pag. 128-129, Moscow, 1985;
- [33] Cividjian, G.A., *Vlianie glubiny paza i nasyscenia na koeffitient vozdušnogo zazora, (Influence of the slot depth and of the saturation on the Carter coefficient)*, Elektrichestvo, nr.6, pag. 59-61, ISSN 0013-5380, 1986;
- [34] Cividjian, G.A., *Aparate electrice. Izolație și arc*, Editura Avrămeanca, Craiova, 1996;
- [35] Cividjian, G.A. ș.a., *Power approximation of boundary conditions*, Seconde Conférence Européenne sur les Méthodes Numériques en Electromagnetisme, NUMELEC '97, 19-21 martie, pag. 252-253, Lyon, 1997;
- [36] Cividjian, G.A. ș.a., *Inductance of a plunger-type magnet*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 34, nr. 5, pag. 3695-3688, septembrie, 1998;
- [37] Cividjian, G.A., Cividjian, A.G., Silvis-Cividjian, N.G., *Some formulas for two-dimensional permeances*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 36, nr. 5, septembrie 2000, pag. 3754-3758;
- [38] Cividjian, G.A., Cividjian, A.G., Silvis-Cividjian, N.G., *Two formulas for 2D permeances*, COMPEL - International journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, vol. 19, nr. 2, 2000, pag. 260-267, ISSN 0332-1649;
- [39] Cividjian, G.A., Pascu, Ileana, Bunescu, A., Matei, D., M., **Dolan, A.**, *Experimental study of the resistance of flat Cu-W contacts*, XIIth International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies - SIELA 2001, vol. I, pag. 58-65, Plovdiv, Bulgaria, 31 mai – 1 iunie, 2001;
- [40] Cividjian, G.A., **Dolan, A.**, Klimov, V., Canakoglu, A., I., *Inductance of plunger -type electromagnet*, International Conference on Applied and Theoretical Electricity - ICATE 2002, pag. 193-198, Băile Herculane, Romania, 17-19 octombrie, 2002;
- [41] Cividjian, G.A., *Current distribution in rectangular busbars*, Revue Roumaine des Sciences Electrotechnique et Energétiques, vol. 48, nr. 2/3, pag. 313–320, București, 2003;
- [42] Cividjian, G.A., *Current distribution in variable section fuses*, Seventh International Conference on Electrical Fuses and their Applications - ICEFA, Gdansk-Jurata, Polonia, 8-10 septembrie, 2003, pag. 194-199, ISBN 83-88829-76-9;
- [43] Cividjian, G.A., Călin, G., Popa, D., **Dolan, A.**, *Modeling lightning surges in power transformer*, The Second International Symposium on High Voltage and High Power Tests, Measurements and Quantification of Electrical Power Equipment - SIMC-EE 2004, Băile Herculane, 13-15 octombrie, 2004, CD;
- [44] Cividjian, G.A., **Dolan, A.**, Păduraru, N., *Inductance of Cylindrical Coil*, Serbian Journal of Electrical Engineering, vol. 1, nr.2, pag. 143-151, Technical Faculty of Cacak, Serbia and Montenegro, iunie, 2004, ISSN 1451-4869;
- [45] Cividjian, G.A., Călin, G., Popa, D., **Dolan, A.**, *Impedance voltage of power multi-winding autotransformer*, XIVth International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies - SIELA 2005, vol. I, pag. 39-44, Plovdiv, Bulgaria, 2-3 iunie, 2005, ISBN 954-90209-4-0;
- [46] Cividjian, G.A., *Some formulas for partial capacitances*, International PhD Seminar - Numerical Field Computation and Optimization in Electrical Engineering, pag. 45-54, Ohrid, Macedonia, 20-25 septembrie, 2005;
- [47] Cividjian, G.A., Cividjian, A.G., *Constriction and corner permeances for finite domains*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 42, nr. 12, decembrie 2006, pag. 3825-3831;
- [48] Cividjian, G.A., *Initial magnetic field distribution around high rectangular busbars*, Simpozionul Național de Electrotehnică Teoretică - SNET '07, 12-14 octombrie, București, 2007 (nepublicată);
- [49] Cividjian, G.A., *Initial magnetic field distribution around rectangular busbars*, Analele Universității din Craiova, Seria: Inginerie Electrică, nr. 32, pag. 68-71, 2008, Editura Universitaria, ISSN 1842-4805;
- [50] Cividjian, G.A., *Permeance of fringing flux*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 45, nr. 2, februarie 2009, pag. 694-700;
- [51] Cividjian, G.A., **Dolan, A.**, Yatchev, I., Hinov, K., *On the tractive force of plunger-type magnet*, XVIth International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies - SIELA 2009, vol. I, pag. 63-70, Burgas, Bulgaria, 4-6 iunie, 2009, ISBN 978-954-323-530-8;
- [52] Coulomb, J.L., *Finite element three dimensional magnetic field computation*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. MAG-17, nr. 6, noiembrie 1981, pag. 3241-3246;
- [53] Coulomb, J.L., *A methodology for the determination of global electromagnetic quantities from a finite element analysis and its application*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. MAG-19, nr. 6, noiembrie 1983, pag. 2514-2519;
- [54] Coulomb, J.L., Meunier, G., *Finite element implementation of virtual work principle for magnetic or electric force and torque computation*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. MAG-20, nr. 5, septembrie 1984, pag. 1894-1896;
- [55] Coulomb, J.L., Meunier, G., Sabonnadiere, J.C., *Energy methods for the evaluation of global quantities and integral parameters in a finite elements analysis of electromagnetic devices*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. MAG-21, nr. 5, septembrie 1985, pag. 1817-1822;

- [56] De Medeiros, L.H.A., *Méthodes de calcul des forces électromagnétiques. Application au calcul des distributions de forces sur les aimants permanents*, Teză de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, (LEG), 1998;
- [57] Dedule, J.M., *Contribution à la modélisation bidimensionnelle et tridimensionnelle des phénomènes d'anisotropie dans transformateurs triphasés*, Teză de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, (LEG), 1990 ;
- [58] Demerdash, N.A., Fouad, F.A., Nehl, T.W., Mohamed, O.A., *Three dimensional finite element vector potential formulation of magnetic fields in electrical apparatus*, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, nr. 8, August 1981, pag. 4104-4111;
- [59] Démidovitch, B., Maron, I., *Éléments de calcul numérique*, Éditeur Mir, Moscou, 1979;
- [60] Demski, W., Szymanski, G., *Comparison of the force computation using the vector and scalar potential for 3-D*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 33, nr. 2, martie 1997, pag. 1231-1234;
- [61] **Dolan, A.**, Yatchev, I., Hinov, K., *Static force characteristics of a plunger type electromagnet*, International PhD Seminar - Numerical Field Computation and Optimization in Electrical Engineering, Ohrid, Macedonia, 20-25 septembrie, 2005, pag. 67-71;
- [62] **Dolan, A.**, *Metode numerice de calcul al câmpurilor electrice, magnetice și termice*, Referat doctorat, Universitatea din Craiova, mai 2006;
- [63] **Dolan, A.**, *Softuri comerciale pentru modelarea câmpurilor și a regimurilor tranzitorii*, Referat doctorat, Universitatea din Craiova, mai 2006;
- [64] **Dolan, A.**, Yatchev, I., Hinov, K., *Comparison of different formulations and techniques for 3D static force computation of a T-shaped electromagnet*, International PhD Seminar - Computational Electromagnetics and Technical Applications, pag. 73-77, Banja Luka, Bosnia și Herțegovina, 28 August - 1 Septembrie, 2006, ISBN 99938-793-5-5;
- [65] **Dolan, A.**, Cividjian G.A., Yatchev, I., Călin, G., Popa, D., *Three dimensional numerical solution for impedance voltage of power multi-winding autotransformer*, Analele Universității din Craiova Craiova, Seria: Inginerie electrică, nr. 30, pag. 326-329, 2006, Editura Universitaria, ISSN 1842-4805;
- [66] **Dolan, A.**, *Simulation de dispositifs électrotechniques par FLUX 2D-3D - Transformateur triphasé*, Rapport de stage, Laboratorul de Inginerie Electrică din Grenoble (G2Elab), Franța, martie 2007;
- [67] **Dolan, A.**, Cividjian, G.A., Yatchev, I., Calin, G., Popa, D., *Different formulations for power multi-winding autotransformer impedance voltage evaluation*, XVth International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies - SIELA 2007, vol. II, pag. 15-24, Plovdiv, Bulgaria, 31 mai - 1 Iunie, 2007, ISBN 978-954-9726-01-5;
- [68] **Dolan, A.**, *Parametrii tranzitorii ai circuitelor electrice liniare*, Referat doctorat, Universitatea din Craiova, septembrie 2007;
- [69] **Dolan, A.**, Cividjian, G.A., *Numerical solutions for transient electromagnetic field in rectangular bus bars*, Simpozionul Național de Electrotehnică Teoretică - SNET '07, 12-14 octombrie, pag. 406-411, București, 2007;
- [70] **Dolan, A.**, Cividjian G.A., *Numerical determination of rectangular busbars transient parameters*, Analele Universității din Craiova, Seria: Inginerie electrică, nr. 32, pag. 210-215, 2008, Editura Universitaria, ISSN 1842-4805;
- [71] Du, I.M., Xia, P.C., Xiao, L.Y., *Calculating magnetic force of permanent magnet using Maxwell stress method*, IEEE Transaction on Applied Superconductivity, vol. 10, nr. 1, martie 2000, pag. 1392-1394;
- [72] Dufour, F., *Développement de la méthode des éléments finis avec des points d'intégration lagrangiens: application à la géomécanique*, Teză de doctorat, École Centrale de Nantes & Université de Nantes, 2002;
- [73] Ebâncă, D., *Metode de calcul numeric*, Editura Sitech, Craiova, 1994;
- [74] *FEMM, Version 3.4, User's Manual*, 2005;
- [75] *FLUX 9.3.2, Guide d'utilisation*, 2006;
- [76] Freeman, E.M., Ashen, E.M., *Force calculation in magnetic field problems using virtual work with only one solution*, Sixth International Conference on Electrical Machines and Drives, 8-10 septembrie, 1993, pag. 318-322;
- [77] Giannacopoulos, D., McFee, S., *An experimental study of superconvergence phenomena in finite element magnetics*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 33, nr. 5, septembrie 1997, pag. 4137-4139;
- [78] Golias, N.A., Tsiboukis, T.D., *Magnetostatics with edge elements: a numerical investigation in the choice of the tree*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 30, nr. 5, septembrie 1994, pag. 1488-1491;
- [79] Guerin, C., *Détermination des pertes par courants de Foucault dans les cuves de transformateurs. Modélisation de régions minces et prise en compte de la saturations des matériaux magnétiques en regime harmoniques*, Teză de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, (LEG), 1994;
- [80] Guillen, M., Poittevin, J., Aucourt, Ch., *Modélisation numérique et essais: complémentarité de deux moyens d'investigation pour la haute tension*, Revue de l'Electricité et de l'Electronique (REE), nr. 10, Novembre, pag. 15-20, 1996;
- [81] Gușă, M.D., *Regimuri tranzitorii în rețelele electrice*, Editura „Gh. Asachi”, Iași, 2002;
- [82] Gyimesi, M., Lavers, D., *Generalized potential formulation for 3-D magnetostatic problems*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 28, nr. 4, iulie 1992, pag. 1924-1929;
- [83] Gyimesi, M., Lavers, D., Pawlak, T., Ostergaard, D., *Application of the general potential formulation*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 29, nr. 2, martie 1993, pag. 1345-1347;
- [84] Gyimesi, M., Lavers, D., Pawlak, T., Ostergaard, D., *Biot-Savart integration for bars and arcs*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 29, nr. 6, noiembrie 1993, pag. 2389-2391;

- [85] Gyimesi, M., Avdeev, I., Ostergaard, D., *Finite Element Simulation of Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) by Strongly Coupled Electro Mechanical Transducers*, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 40, nr. 2, pag. 557–560, 2004;
- [86] Hebrin, R., *Cours d'analyse numérique 2004-2005*, Cours, Master de Mathématique, Université Aix Marseille 1, 2004;
- [87] Hennenberger, G., *Force calculation with analytical accuracy in the finite element based computational magnetostatics*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 27, nr. 5, septembrie 1991, pag. 4254-4257;
- [88] Heydari, H., Pedramrazi, S.H., Faghihi, F., *The effects of windings current density values on leakage reactance in a 25 kA current injection transformer*, The 7th International Power Engineering Conference - IPEC 2005, 29 noiembrie - 02 decembrie, 2005, pag. 648-652;
- [89] International Electrotechnical Commission (IEC), *Multi-Lingual Dictionary of Electricity, Electronics, and Telecommunications*, vol. 1, Elsevier, Amsterdam, New-York, Tokyo, Oxford, 1992;
- [90] Imhoff, J.F., *Modélisation magnétique et mécanique des machines électriques par la méthode des éléments finis*, Teză de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, (LEG), 1989;
- [91] International Compumag Society (ICS), Testing Electromagnetic Analysis Methods (TEAM), *Problem 13*;
- [92] International Compumag Society (ICS), Testing Electromagnetic Analysis Methods (TEAM), *Problem 20*;
- [93] Ioan, D., Munteanu, Irina, Ionescu, B., Popescu, M., Popa, R., Lăzărescu, M., Ciuprina, Gabriela, *Metode numerice în ingineria electrică*, Editura Matrix Rom, București, 1998;
- [94] Ito, M., Tajima, F., Kanazawa, H., *Evaluation of force calculation methods*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 26, nr. 2, Martie 1990, pag. 1035-1038;
- [95] Ivanov, Virginia, *Aplicații în Mathcad și Matlab*, vol. I, Editura Universitaria, Craiova, 2008;
- [96] Joan, M., *Modélisations des paramètres R et L de matériels électriques bobinés par la méthode des éléments finis 3D*, Teză de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, (LEG), 2004 ;
- [97] Kabashima, T., Kawahara, A., Goto, T., *Force calculation using magnetizing currents*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 24, nr. 1, ianuarie 1988, pag. 451-454;
- [98] Karsay, K., Kerényi, D., Kiss, L., *Large Power Transformers*, Akademiai Kiado, Budapest, 1987;
- [99] Kashtiban, A.M., Vahedi, A., Halvaei, A., *Investigation of winding type effect on leakage flux of single phase shell type transformer using FEM*, Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems - ICEMS 2005, vol. 3, 29 septembrie, 2005, pag. 1755-1758;
- [100] Kanai, Y., Abe, T., Sengoku, M., Iijima, T., Iizuka, M., Mukasa, K., *New formulation of finite-element method with gauge condition for three-dimensional magnetic field analysis*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. MAG-24, nr. 6, noiembrie 1988, pag. 3123-3125;
- [101] Kanai, Y., Abe, T., Sengoku, M., Iijima, T., Iizuka, M., Mukasa, K., *Further discussion on magnetic vector potential finite-element formulation for three-dimensional magnetostatic field analysis*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 26, nr. 2, martie 1990, pag. 411-414;
- [102] Kim, D.H., Lowther, D.A., Sykulski, J.K., *Efficient force calculation based on continuum sensitivity analysis*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 41, nr. 5, mai 2005, pag. 1404-1407;
- [103] Kladas, A.G., Papadopoulos, M.P., Tegopoulos, J.A., *Leakage flux and force calculation on power transformer windings under short-circuit: 2-D and 3-D models based on the theory of images and the finite element method compared to measurements*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 30, nr. 5, septembrie 1994, pag. 3487-3490;
- [104] Komeza, K., Pelikant, A., Tegopoulos, J., Wiak, S., *Comparative computation of forces and torques of electromagnetic devices by means of different formulae*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 30, nr. 5, septembrie 1994, pag. 3475-3478;
- [105] Kostensko, M., Piotrovski, L., *Mașini electrice* (în franceză), Mir, Moscova, 1976 ;
- [106] Krylov, V.I., Skoblyba, N.S., *Handbook for numerical Laplace inversion* (în rusă), Nauka I Tehnika, pag. 18 și 53, Minsk, 1968;
- [107] Lefevre, A., Miegerville, L., Fouladgar, J., Olivier, G., *3-D computation of transformers overheating under nonlinear loads*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 41, nr. 5, Mai 2005, pag. 1564-1567;
- [108] Lefevre, A., *Contributions à la modélisation électrique, électromagnétique et thermique des transformateurs - Application à l'étude de l'échauffement sur charges non linéaires*, Teză de doctorat, Université de Nantes, 2006 ;
- [109] Longfù, L., Ziya, W., Tiaosheng, T., *The method solving short-circuit impedance between two interleave windings in the multi-winding core-type transformer with finite element method*, Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems - ICEMS 2001, vol. 1, 18-20 august, 2001, Shenyang, China, pag. 254-256;
- [110] Lowther, D.A., *The implications of three-dimensional mesh generation on the calculation of mechanical forces in magnetic devices*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 26, nr. 5, septembrie 1990, pag. 2777-2779;
- [111] Marinescu, A., *Transformer behaviour at switching overvoltages* (în romanian), Editura Tehnică, București, 1988;
- [112] Marinescu, A., Călin, Gh., *HV Power Auto-Transformers Protected for Internal Overvoltages*, Proceedings of the 8th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipments, 16-17 mai, Brașov, 2002;
- [113] Markovici, J., *Asupra regimului permanent periodic în conductoare masive*, Analele Universității din Craiova - Matematică, fizică, chimie, electrotehnică, seria a V-a, nr. 2, pag. 205-208, 1973;

- [114] Maiergoyz, I.D., Chari, M.V.K., D'Angelo, J., *A new scalar potential formulation for three dimensional magnetostatic problems*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. MAG-23, nr. 6, noiembrie 1987, pag. 3889-3894;
- [115] Meunier, G., *Electromagnétisme et problèmes couplés*, Hermès Science Publications, Paris, 2002;
- [116] McFee, S., Lowther, D.A., *Towards accurate and consistent force calculation in finite element based computational magnetostatic*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. MAG-23, nr. 5, septembrie 1987, pag. 3771-3773;
- [117] McFee, S., Webb, J.P., Lowther, D.A., *A tunable volume integration formulation for force calculation in finite element based computational magnetostatic*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 24, nr. 1, ianuarie 1988, pag. 439-442;
- [118] Mizia, J., Adamiak, K., Eastham, A.R., Dawson, G.E., *Finite element force calculation: comparison of methods for electric machines*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 24, nr. 1, ianuarie 1988, pag. 447-450;
- [119] Mocanu, C.I., *Teoria câmpului electromagnetic*, EDP, București, 1981;
- [120] Morega, M., A., *Elemente de modelare numerică pentru probleme la limită*, Reprografia UPB, 1997;
- [121] Morisue, T., *Infinitely many formulation using the magnetic vector potential with the Coulomb gauge for the 3-D field calculations*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 26, nr. 2, martie 1990, pag. 715-718;
- [122] Müller, W., *Comparison of different methods of force calculation*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 26, nr. 2, martie 1990, pag. 1058-1061;
- [123] Nakata, T., Takahashi, N., Fujiwara, K., Imai, T., Muramatsu, K., *Comparison of various methods of analysis and finite elements in 3-D magnetic field analysis*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 27, nr. 5, septembrie 1991, pag. 4073-4076;
- [124] Nehl, T.W., *Accuracy of force calculations using first order tetrahedra for electromagnetic devices with small air gaps*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 27, nr. 5, septembrie 1991, pag. 4250-4253;
- [125] Nens, E., *Contribution à la modélisation des structures symétriques en électromagnétisme*, Teză de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, (LEG), Faculté Polytechnique de Mons, 2002;
- [126] Nicolaide, A., *Bazele fizice ale electrotehnicii*, vol. I-II, Editura Scrisul Românesc, Craiova, 1983;
- [127] Nguegueu, T., *Contribution à la modélisation mathématique et informatique des pertes supplémentaires dans les transformateurs de puissance de type cuirasse*, Teză de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, (LEG), 1989 ;
- [128] Ohdachi, Y., Kawase, Y., Tainaka, T., Yamaguchi, T., *Load characteristics analysis of coupling transformer using 3-D finite element method with edge elements*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 30, nr. 5, septembrie 1994, pag. 3721-3724;
- [129] Olaru, D., *Metode numerice - Aplicații implementate în MathCad*, Reprografia UPB, 2002;
- [130] Park, Y.G., Kim, H., Hahn, S., *An adaptive finite element method for magnetostatic force computation*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 26, nr. 2, martie 1990, pag. 1031-1034;
- [131] Păltineanu, G., Matei, P., Trandafir, R., *Bazele analizei numerice*, Editura Printech, București, 2000;
- [132] Petrov, G.N., *Электрические машины ч. 1, Трансформаторы*, ГЭИ, Москва, 1956;
- [133] Popa, I., *Modélisation numérique du transfert thermique - Méthode des volumes finis*, Editura Universitaria, Craiova, 2002;
- [134] Prasad, K.M., Davey, K.R., *A boundary element analysis of Team Problem no. 20: Static force calculation*, 4th International TEAM Workshop, noiembrie 1993;
- [135] Preda, M., Markovici, J., Topan, D., *Asupra imitațiilor parametrilor tranzitorii pentru circuitele nefiliiforme, a relațiilor dintre acestea și parametrii de regim nesinusoidal*, EEA – Electrotehnica, anul 23, nr. 1, pag. 15-22, 1975;
- [136] Preda, M., ș.a., *Bazele electrotehnicii*, vol. I, EDP, București, 1980;
- [137] Preis, K., Bardi, I., Biro, O., Magele, C., Renhart, W., Richter, K.R., Vrisk, G., *Numerical analysis of 3-D magnetostatic fields*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 27, nr. 5, Septembrie 1991, pag. 3798-3803;
- [138] Preis, K., Bardi, I., Magele, C., Vrisk, G., Richter, K.R., *Different finite element formulations of 3-D magnetostatic fields*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 28, nr. 2, martie 1992, pag. 1056-1059;
- [139] Prikler, L., Hoidalén, H., K., *ATPDRAW ver. 3.5 for Windows, Preliminary Release no. 1*, august, 2002;
- [140] Răduleț, R., Timotin, A., Țugulea, A. *Introducerea parametrilor tranzitorii în studiul circuitelor electrice lineare având elemente nefiliiforme și pierderi suplimentare*, Revue Roumaine des Sciences Electrotechnique et Énergétiques, Studii și cercetări de energetică și electrotehnică, tom 16, nr. 4, pag. 857-929, Editura Academiei RSR, București, 1966;
- [141] Răduleț, R., *Bazele electrotehnicii - probleme*, vol. I-II, EDP, București, 1981;
- [142] Ren, Z., Razek, A., *Force calculation by Maxwell stress tensor in 3-D hybrid finite element - boundary integral formulation*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 26, nr. 5, septembrie 1990, pag. 2774-2776;
- [143] Ren, Z., *Comparison of different force calculation methods in 3-D finite element modeling*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 30, nr. 5, septembrie 1994, pag. 3471-3474;
- [144] Ren, Z., Cendes, Z., *Shell elements for the computation of magnetic forces*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 37, nr. 5, septembrie 2001, pag. 3171-3174;
- [145] Sabonnadière, J.C., Coulomb J.L., *La méthode des éléments finis. Du modèle... à la CAO*, Éditeur Hermes, Paris-Londres-Laussane, 1986;
- [146] Shi, Z.W., Rajanathan, C.B., *A new method to improve the accuracy of Maxwell stress based force calculation in computational electromagnetic fields*, Third International Conference on Computation in Electromagnetics, 10-12 aprilie, 1996, pag. 241-246;

- [147] Silvester, P., Cabayan, H.S., Browne, B.T., *Efficient techniques for finite element analysis of electric machines*, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-92, nr. 4, iulie 1973, pag. 1274-1281;
- [148] Smajic, J., Madzarevic, V., Berberovic, S., *Numerical calculation of power transformers equivalent circuit parameters*, International Conference on Electric Power Engineering - PowerTech Budapest '99, 29 august - 2 septembrie, 1999, pag. 96;
- [149] Spasov, V., *Computation of electromagnetic force by the nodal force method*, 14th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies - SIELA 2005, vol. 2, Plovdiv, Bulgaria, 2-3 iunie, 2005, pag. 139-144;
- [150] Șora, C., *Bazele electrotehnicii*, EDP, București, 1982;
- [151] Takahashi, N., Nakata, T., Fujiwara, K., Imai, T., *Investigation of effectiveness of edge elements*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 28, nr. 2, martie 1992, pag. 1619-1622;
- [152] Takahashi, N., *Investigation of a model to verify software for 3-D static force calculation*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 30, nr. 5, septembrie 1994, pag. 3483-3486;
- [166] Yatchev, I., *Modélisation numérique par la méthode des éléments finis*, Seminar, Universitatea din Craiova, 2002;
- [153] Takahashi, N., Nakata, T., Morishije, H., *Summary of results for Problem 20 (3D static force problem)*, The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering - COMPEL, vol. 14, nr. 2&3, 1995, pag. 57-75, ISSN: 0332-1649;
- [154] Tärnhuvud, T., Reichert, K., *Accuracy problems of force and torque calculation in FE-systems*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 24, nr. 1, ianuarie 1988, pag. 443-446;
- [155] Tihomirov, P.M., *Расчет трансформаторов*, Энергоатомиздат, Москва, 1986;
- [156] Timotin, A., Hortopan, V., Ifrim, A., Preda, M., *Lecții de bazele electrotehnicii*, EDP, București, 1970;
- [157] Tomczuk, B., Zakrzewski, K., Koteraz, D., *Magnetic field and short-circuit reactance calculation of the 3-phase transformer with symmetrical amorphous core*, 11-th International Symposium on Electromagnetic fields in Electrical Engineering - ISEF 2003, Maribor, Slovenia, 18-20 septembrie, 2003, pag. 227-230;
- [158] Tsili, M.A., Kladas, A.G., Georgilakis, P.S., Souflaris, A.T., Pitsilis, C.P., Bakopoulos, J.A., Paparigas, D.G., *Hybrid numerical techniques for power transformer modeling: a comparative analysis validated by measurements*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 40, nr. 2, martie 2004, pag. 842-845;
- [159] Tsili, M.A., Kladas, A.G., Georgilakis, P.S., Souflaris, A.T., Paparigas, D.G., *Geometry optimization of magnetic shunts in power transformers based on a particular hybrid finite-element boundary-element model and sensitivity analysis*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 41, nr. 5, mai 2005, pag. 1777-1780;
- [160] Tușaliu, P., Georgescu, D., Matei, D., Chelaru, R., Ivanov, V., Dolan, A., *About modeling of overvoltages in power systems at the transients due to switching operations of multiple capacitor banks*, Lucrările științifice ale Simpozionului Național de Electrotehnică - ELECTRO '99, vol. I, pag. 153-156, Craiova, Romania, 27-28 august, 1999;
- [161] Țugulea, A., *Regimul tranzitoriu al câmpului electromagnetic inductiv într-un sistem de bare conductoare masive. Parametrii tranzitorii*, Studii și cercetări de energetică și electrotehnică, tom 22, nr. 1, pag. 67-93, Editura Academiei RSR, București, 1972;
- [162] Webb, F.J., Forghani, B., *A single scalar potential method for 3-D magnetostatics using edge elements*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 25, nr. 5, septembrie 1989, pag. 4126-4128;
- [163] Webb, F.J., *Edge elements and what they can do for you*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 29, nr. 2, martie 1993, pag. 1460-1465;
- [164] Webb, J.P., *An estimator for force errors in finite-element analysis*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 39, nr. 3, mai 2003, pag. 1428-1431;
- [165] Wignall, A.N., Gilbert, A.J., Yang, S.J., *Calculation of forces on magnetised ferrous cores*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 24, nr. 1, ianuarie 1988, pag. 459-462;
- [166] Yatchev, I., *Modélisation numérique par la méthode des éléments finis*, Seminar, Universitatea din Craiova, 2002;
- [167] Yu, H.T., Ho, S.L., Hu, M.Q., Wong, H.C., *Edge-based FEM-BEM for Wide-Band electromagnetic computation*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 42, nr. 4, aprilie 2006, pag. 771-774;
- [168] Zienkiewicz, O., Liness, J., *Three magnetic field determination using a scalar potential - A finite element solution*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. MAG-13, nr. 5, septembrie 1977, pag. 1649-1656;
- [169] Zlatkov, Z., Yatchev, I., Hinov, K., Resano, F., *Static force characteristics of a linear DC actuator using 3D FEM and experiment electromagnet*, International PhD Seminar - Numerical Field Computation and Optimization in Electrical Engineering, Ohrid, Macedonia, 20-25 septembrie, 2005, pag. 207-211;
- [170] <http://www.acad.ro>;
- [171] <http://www.ansys.com/>;
- [172] <http://www.cedrat.com/>;
- [173] <http://www.eeug.org>;
- [174] <http://www.emtp.org/>;
- [175] <http://femm.foster-miller.net>;
- [176] <http://www.lua.org/>;
- [177] <http://www.ocsimize.com/fr/quickfield.htm>;
- [178] <http://www.ptc.com/>;
- [179] <http://www.quickfield.com/>.

CURRICULUM VITAE

Nume: **DOLAN**
 Prenume: **Alin-Iulian**
 Naționalitatea: Română
 Data și locul nașterii: 1 iulie 1971, Craiova, ROMÂNIA
 Starea civilă: Necăsătorit
 Adresa de domiciliu: Strada Dr. Victor Papillian, Nr. 1, Bl. A3, Sc. 1, Ap. 20, CRAIOVA, 200323, DOLJ, ROMÂNIA



Telefon personal: + 40 351 426 259 (domiciliu)
 + 40 721 902 301 (mobil)

E-mail: adolan@elth.ucv.ro, alin_dolan@yahoo.com

Profesia: Inginer profil electric
 Locul de muncă: Universitatea din Craiova, Facultatea de Electrotehnică, ROMÂNIA
 Funcția: Șef lucrări universitar
 Adresa profesională: Facultatea de Electrotehnică, Bd. Decebal, Nr. 107, CRAIOVA, 200440, DOLJ, ROMÂNIA
 Tel. / Fax: + 40 251 436 447
 Telefon birou: + 40 251 435 724 / 127

Studii

| Tipul diplomei | Instituția | Anul |
|---|---|------|
| Certificat de formare lingvistică: Franceză generală (378 ore) - nivel 7/12, nivel B1 Franceză științifică și tehnică (108 ore) | Institutul Francez din Sofia | 2005 |
| Certificat de absolvire a Departamentului pentru pregătirea personalului didactic | Universitatea din Craiova | 2002 |
| Diplomă de Studii Aprofundate, Master profil electric, Specializarea tehnologiei ecologice | Facultatea de Electrotehnică, Universitatea din Craiova | 1996 |
| Diplomă de licență, Inginer profil electric, Specializarea electrotehnică generală | Facultatea de Electrotehnică, Universitatea din Craiova | 1995 |
| Diplomă de Bacalaureat, Electronist | Liceul de matematică-fizică Nicolae Bălcescu, Craiova | 1990 |

Experiență profesională

| Funcția | Instituția | Perioada |
|---------------------------------|---|-------------------------|
| Șef lucrări universitar titular | Facultatea de Electrotehnică, Universitatea din Craiova | 23.02.2009 - prezent |
| Asistent universitar titular | Facultatea de Electrotehnică, Universitatea din Craiova | 25.02.2002 - 22.02.2009 |
| Preparator universitar titular | Facultatea de Electrotehnică, Universitatea din Craiova | 01.03.1999 - 24.02.2002 |
| Lector | Pop Service Electronic HQ, Craiova | 01.04.1998 - 31.05.1998 |

Burse de formare-cercetare în străinătate

| Tipul bursei | Instituția | Perioada |
|---|---|-------------------------|
| Bursă de formare în cercetare - Agenția Universitară a Francofoniei (AUF) Program tematic de susținere nr. 6 - Mobilitate științifică și universitară | Școala Doctorală Internațională de Inginerie, Filiera Francofonă, Universitatea Tehnică din Sofia Responsabil științific: Prof. dr. ing. Ivan YATCHEV | 31.03.2007 - 01.08.2007 |
| | Institutul Național Politehnic din Grenoble, Laboratorul de Inginerie Electrică din Grenoble Responsabili științifici: Prof. dr. ing. Gérard MEUNIER Prof. dr. ing. Albert FOGGIA | 02.10.2006 - 30.03.2007 |
| Bursă doctorală - Agenția Universitară a Francofoniei (AUF) Program tematic de susținere nr. 5 - Consolidarea instituțională și științifică a universităților | Școala Doctorală Internațională de Inginerie, Filiera Francofonă, Universitatea Tehnică din Sofia, Centrul regional francofon de inginerie pentru dezvoltare (CREFID) Responsabil științific: Prof. dr. ing. Ivan YATCHEV | 02.08.2007 - 01.09.2007 |
| | | 26.07.2006 - 31.08.2006 |
| | | 01.11.2004 - 22.12.2005 |
| Bursă de formare lingvistică - Ambasada Franței în Bulgaria, Centrul Cultural și de Cooperare | Institutul Francez din Sofia | 01.10.2004 - 22.12.2005 |
| | | 26.07.2004 - 31.08.2004 |

Experiența științifică

- 5 contracte de cercetare științifică
- 15 lucrări științifice

Competențe în informatică

- MICROSOFT OFFICE, TURBOPASCAL, FORTRAN, C++, MATHCAD, MATLAB, QUICKFIELD, FEMM (LUASCRIP), ANSYS (APDL), ATP-EMTP, FLUX

Discipline predate

- Aparate electrice - aplicații
- Echipamente electrice - aplicații
- Concepția asistată a echipamentelor electrotehnice - aplicații
- Tehnica tensiunilor înalte - aplicații
- Bazele electrotehnicii - aplicații
- Programarea calculatoarelor și limbaje de programare - aplicații
- Modele statistice și fiabilitate - curs
- Fiabilitate - curs

Limbi străine cunoscute

- franceză: citit, vorbit, scris
- engleză: citit, vorbit, scris

13.11.2009

Semnătura: