

# UNIVERSITATEA POLITEHNICA DIN BUCUREȘTI școala doctorală de inginerie electrică

# TEZĂ DE DOCTORAT Rezumatul tezei de doctorat

Modele numerice și experimentale de câmp electromagnetic și transfer de căldură în mașini electrice speciale

Conducător științific

Prof. Dr. Ing. Alexandru – Mihail Morega

Doctorand Ing. Ioana Ionică

BUCUREȘTI 2020

Această pagină este lăsată intenționat goală

# Cuprins

Structura capitolelor tezei de doctorat
CAPITOLUL 1 INTRODUCERE
1.1. Motorul de cuplu de curent continuu cu unghi limitat
1.2. Particularități și avantaje ale DC-LATM
1.3. Aplicații ale DC-LATM
CAPITOLUL 2.ETAPE DE MODELARE
2.1. Câmp electromagnetic și transfer de căldură în motoare DC-LATM
2.2. Problema de câmp electromagnetic9
2.2.1. Model fizic
2.2.2. Model matematic pentru problema de câmp electromagnetic în DC-LATM9
2.3. Probleme de transfer de căldură în DC-LATM 10
2.3.1. Model fizico - matematic10
CAPITOLUL 3 MODELAREA MOTOARELOR DE CURENT CONTINUU DE CUPLU CU UNGHI LIMITAT
3.1. Introducere
3.2. Proiectarea DC-LATM-S
3.2.1. Soluția constructivă 111
3.2.2. Soluția constructivă 212
3.2.3. Modelarea tri-dimensională
3.3. Motorul de curent continuu de cuplu, cu unghi limitat tip DC-LATM-CR13
3.3.1. Modelarea bi-dimensională
CAPITOLUL 4 MOTOR DE CUPLU DE CURENT CONTINUU CU UNGHI LIMITAT TIP DC-LATM-CI-C
4.1. Modelul bi-dimensional al DC-LATM-CI-C
4.1.1. Varianta Fier-Siliciu pentru pachetul de tole (DC-LATM-CI-B)14
4.1.1.1. Influența soluțiilor constructive ale rotorului asupra caracteristicii cuplu-unghi pentru DC-LATM-CI-B
4.1.2. Varianta Fier-Cobalt pentru pachetul de tole (DC-LATM-CI-C)16
4.1.2.1. Analiza soluțiilor constructive ale rotorului pentru caracteristica cuplu-unghi - DC-LATM-CI-C
4.1.2.2. Distanțieri din Ol - Abaterea caracteristicii cuplu-unghi față de caracteristica ideală
4.1.2.3. Distanțieri din Ol - Abaterea caracteristicii cuplu-unghi față de caracteristica simetrizată

4.1.2.4. Distanțieri din Al - Abaterea caracteristicii cuplu-unghi față de caracteristica ideală
4.1.2.5. Distanțieri din Al - Abaterea caracteristicii cuplu-unghi față de caracteristica simetrizată
4.1.2.6. Studiul asupra analizei numerice a modelului bi-dimensional pentru motorul DC-LATM de tip DC-LATM-CI-C
4.2. Modelul tri-dimensional
4.2.1. Utilizarea elementelor finite de tip "infinit"
CAPITOLUL 5 Modelarea termică a unui motor de cuplu de curent continuu cu unghi limitat, de tip DC-LATM-CI-C
5.1. Introducere
5.2. DC-LATM-CI-C montat într-un dispozitiv din inox nemagnetic – Varianta 1 23
5.3. DC-LATM-CI-C montat într-un dispozitiv din inox nemagnetic – Varianta 2 24
5.4. DC-LATM-CI-C montat în carcasă
5.4.1. Curentul DC-LATM: I = 1.33 A
5.4.2. Curentul DC-LATM: I = 1 A
5.5. Rezultatele experimentale test termic DC-LATM-CI-C. Comparația rezultatelor numerice cu rezultatele experimentale
5.5.1. Curentul DC-LATM: I = 1 A
5.5.2. Curentul DC-LATM: I = 1.33 A
CAPITOLUL 6. Studiu privind abordarea DC-LATM în aplicații pentru diverse domenii – materiale și flux tehnologic
6.1. Specificații sau standarde
6.2. Selectarea materialelor nevalidate pentru aplicații spațiale
6.2.1. Achiziția materialelor
CAPITOLUL 7. MOTOR DE CUPLU DE CURENT CONTINUU CU UNGHI LIMITAT – MODELE EXPERIMENTALE
CONCLUZII
C.1. Concluziile generale
C.2. Contribuțiile originale
C.3. Perspectivele de dezvoltare
ANEXA A1 – Forma generală pentru câmpul magnetic
ANEXA A2. Niveluri TRL
ANEXA A3. Standarde ESA - SELECȚIE
ANEXA A4. Lista de materiale SPACEMATDB - Space Materials DataBase
ANEXA A5. Materiale folosite în aplicațiile pentru spațiu și relevanța parametrilor pentru spațiu asupra selecției de materiale

ANEXA A6. Lista de materiale – DML	31
ANEXA A7. Lista de procese - DPL	31
ANEXA A8. Etapele procesului tehnologic ale unui DC-LATM	31
Bibliografie	32

**Cuvinte cheie**: motor de cuplu de curent continuu cu unghi limitat, mașini electrice speciale, model fizic, model matematic, analiză numerică, model bidimensional, model tridimensional, metoda elementului finit, proiectare optimă, câmp electromagnetic, transfer de căldură, regresie liniară, abatere relativă, abatere absolută, spațiu, vid, ROSA, ESA, EM, QM, model experimental, DC-LATM.

## STRUCTURA CAPITOLELOR TEZEI DE DOCTORAT

Teza de doctorat "Modele numerice și experimentale de câmp electromagnetic și transfer de căldură în mașini electrice speciale" este structurată în 7 capitole, concluzii, anexe și bibliografie.

Capitolul 1, "Introducere", prezintă noțiuni introductive despre motoarele de curent continuu cu unghi limitat – DC-LATM și este alcătuit din trei subcapitole. 1.1. "Motorul de cuplu de curent continuu cu unghi limitat" este primul subcapitol și prezintă situația și tipurile de DC-LATM fabricate pe plan național și mondial. Al doilea subcapitol, 1.2. "Particularități și avantaje ale DC-LATM" prezintă structura, avantaje, particularități și caracteristici tehnice ale DC-LATM. În ultimul subcapitol, 1.3. "Aplicații ale DC-LATM", sunt evidențiate aplicațiile acestor tipuri de motoare.

În Capitolul 2, "ETAPE DE MODELARE", se tratează modul de abordare în analiza unei probleme. Subcapitolul 2.1, "Modelarea problemelor de câmp electromagnetic și transfer de căldură în motoare de tip DC-LATM", prezintă etapele de rezolvare al problemelor de câmp electromagnetic și transfer de căldură. Subcapitolele 2.2 "Problemă de câmp electromagnetic" și 2.3 "Probleme de transfer de căldură în DC-LATM" tratează problemele de câmp electromagnetic și transfer de căldură. În secțiunile 2.2.1, 2.2.2 și 2.3.1, se stabilesc ipotezele fizice simplificatoare ale analizei și regimul de funcționare. Sunt identificate principalele mărimi fizice care caracterizează funcționarea DC-LATM. Sunt prezentate relațiile de dependență între mărimile determinate la modelul fizic și exprimarea sub o formă matematică consitentă (existența unicitatea soluției). Informații se găsesc în ANEXA A1.

Capitolul 3, "Modelarea motoarelor de curent continuu de cuplu cu unghi limitat", este dedicat modelelor numerice pentru DC-LATM. Subcapitol 3.1. "Introducere" prezintă calculul unor mărimi și caracteristici specifice DC-LATM folosind un pachet de programe. Al doilea subcapitol 3.2. "Proiectarea DC-LATM-S" descrie modelarea numerică și rezultatele obținute pentru un DC-LATM considerând două soluții constructive. Subcapitolul 3.3. "Motor de cuplu de curent continuu cu unghi limitat tip DC-LATM-CR" tratează modelarea numerică și rezultatele obținute pentru acest tip de motor. Descrierea și formularea problemei, prezentarea particularităților fiecărui motor, rezultatele studiului numeric și interpretarea acestora sunt realizate pentru fiecare dintre cele două modele DC-LATM.

Capitolul 4, "Motor de cuplu de curent continuu cu unghi limitat tip DC-LATM-CI-C", descrie modelele numerice pentru un caz particular de DC-LATM, ales pentru caracteristicile speciale constructive pe care le prezintă. Subcapitol, 4.1. "Modelul bi-dimensional al DC-LATM-CI-C", prezintă particularitățile, analiza numerică și rezultatele de modelare obținute pentru DC-LATM-CI-B și DC-LATM-CI-C. Este prezentată analiza numerică a influenței soluțiilor constructive ale rotorului asupra caracteristicii cuplu-unghi pentru DC-LATM-CI-B și DC-

LATM-CI-C. S-au analizat diferite variante ale rotorului prin redimensionarea magneților de întărire a câmpului și s-a calculat abaterea caracteristicii cuplu-unghi față de caracteristica ideală și față de simetrie. Rezultatele obținute sunt prezentate și analizate. În cel de-al doilea subcapitol, 4.2. "Modelul tri-dimensional" sunt analizate numeric modele 3D care elimină anumite ipoteze simplificatoare ale modelului 2D și care utilizează elemente finite de tip "infinit".

Capitolul 5 "Modelarea termică a unui motor de cuplu de curent continuu cu unghi limitat tip DC-LATM-CI-C" are drept obiectiv evaluarea comportamentului termic al motorului analizat în Capitolul 4. În Subcapitolele: 5.1. "Introducere", 5.2. "DC-LATM-CI-C montat într-un dispozitiv din inox nemagnetic – Varianta 1", 5.3. "DC-LATM-CI-C montat într-un dispozitiv din inox nemagnetic – Varianta 2", 5.4. "DC-LATM-CI-C montat în carcasă", 5.5. "Rezultatele experimentale test termic "DC-LATM-CI-C. Comparația rezultatelor numerice cu rezultatele experimentale", sunt studiate numeric diferite dispozitive pentru montaj. Primele două variante consideră motorul montat în dispozitive realizate din inox nemagnetic. Altă variantă consideră motorul montat în carcasă, fără să fie integrat în sistem. Studiul termic este validat de experiment și permite stabilirea timpului în care temperatura din înfășurări ajunge la valoarea maximă admisă.

În Capitolul 6 este studiat un DC-LATM pentru aplicații militare și aerospațiale, referitor la materiale și flux tehnologic. Aceste informații reprezintă intrările pentru analiza acestui tip de motor pentru aplicații spațiale. Studiul este completat de etapele procesului tehnologic pentru DC-LATM-CI-D și DC-LATM-CI. ANEXELE A2 ÷ A8 oferă informații suplimentare.

Capitolul 7 prezintă modele experimentale pentru două DC-LATM, supuse unui set de măsurători și încercări specifice DC-LATM (obținerea caracteristicii cuplu-unghi pe domeniul de lucru). Datele experimentale obținute în urma măsurătorilor pentru DC-LATM-CI-C sunt comparate cu rezultatele numerice pentru validarea modelelor numerice.

În ultimul capitol, 8, se evidențiază concluziile generale ale cercetării științifice și a rezultatelor obținute în această teză în domeniul motoarelor de tip DC-LATM, contribuțiile personale la această lucrare și perspectivele de dezvoltare ulterioară.

# CAPITOLUL 1 INTRODUCERE

În acest capitol este prezentat motorul de cuplu de curent continuu cu unghi limitat, cu particularități, avantaje și aplicații.

## 1.1. Motorul de cuplu de curent continuu cu unghi limitat

Motoarele de curent continuu se folosesc datorită avantajelor oferite prin caracteristica mecanică natural liniară și suficient de rigidă. Acestea sunt proiectate să funcționeze în construcția "direct-drive", sunt montate direct pe axul de acționare: jugul rotoric pe care sunt plasați magneții are și rolul de arbore al motorului.

Acest tip de motoare este folosit predominant pentru controlul precis al mișcării și este dezvoltat pentru aplicații în care rotirea pe un anumit domeniu unghiular este principala cerință. Aceste motoare au anumite avantaje: inerția mică, funcționează la viteze mai mari, disipă mai bine căldura și sunt mai fiabile. Dezavantajul major este costul ridicat al sistemelor de control însă acesta este evitat prin folosirea unui tip de motor de cc fără perii, numit *motor de cuplu de curent continuu cu unghi limitat* (DC-LATM). Acesta face parte din categoria motoarelor electrice speciale care se deosebesc de mașinile electrice clasice prin construcție, caracteristici și aplicațiile la care se folosesc.

La baza cercetării DC-LATM este analiza situației actuale a acestor tipuri de motoare [1]. S-a studiat piața actuală pentru aceste tipuri de motoare, luându-se în considerare, printre altele, caracteristicile evidențiate de [2-5].

## 1.2. Particularități și avantaje ale DC-LATM

Montat într-un sistem de acționare, DC-LATM este un actuator electromecanic cu unghi limitat. Având o structură simplă formată din două subansambluri, stator și rotor, DC-LATM prezintă fiabilitate ridicată. Avantajele acestui tip de motor sunt: cuplu de agățare foarte redus, accelerație unghiulară mare, densitate de putere mare, eficiență ridicată etc.

## 1.3. Aplicații ale DC-LATM

Acest tip de motor este utilizat în diferite aplicații în care gabaritul și greutatea sistemului constituie o prioritate (sisteme de control, aplicații aerospațiale, orice sistem care necesită domeniu de rotație limitată, tehnică militară etc).

# CAPITOLUL 2. ETAPE DE MODELARE

## 2.1. Câmp electromagnetic și transfer de căldură în motoare DC-LATM

Etapele rezolvării problemelor de câmp electromagnetic și transfer de căldură sunt modelul fizic, modelul matematic asociat și rezolvarea acestuia, prin metode analitice, numerice sau hibride. Modelarea numerică este utilizată în studiul, stabilirea soluției constructive și proiectarea a trei variante de motor DC-LATM. Primul motor, DC-LATM-S, are caracteristicile tehnice specifice TQR-10/2-0.35 [4]; DC-LATM-CR are cuplu ridicat și prezintă caracteristicile tehnice specifice TQR-18-1.06-2CH; iar al treilea motor, DC-LATM-

CI, este prevăzut cu magneți de întărire a câmpului magnetic și prezintă caracteristici tehnice specifice TQR-16/2-0.35 și TQR-16/2-0.35-C. Parametrul principal al acestora este cuplul maxim pe un domeniu unghiular dat, implicit caracteristica cuplu – unghi. Analiza numerică oferă diverse avantaje, printre care și reducerea numărului de încercări (prototipuri) precum și costurile de fabricație.

## 2.2. Problema de câmp electromagnetic

Modelul fizic reprezintă etapa în care se identifică legile (care descriu principiul de funcționare al DC-LATM) împreună cu mărimile fizice aferente.

## 2.2.1. Model fizic

În acest subcapitol este formulată, (2.1a), și rezolvată problema de câmp electromagnetic în *regim magnetic staționar* pentru DC-LATM. Sursele de câmp magnetic sunt înfășurările statorice și magneții permanenți de excitație.

## Teoremele generale ale câmpului electromagnetic

În această secțiune sunt prezentate teoremele generale ale impulsului electromagnetic și ale energiei electromagnetice.

## Interacțiuni în câmp electromagnetic

Echilibrul termic al unui sistem cu exteriorul său este exprimat de Principiul zero a termodinamicii (Maxwell).

## 2.2.2. Model matematic pentru problema de câmp electromagnetic în DC-LATM

În *regim magnetic staționar* (corpuri imobile, mărimi constante în timp) legile câmpului magnetic sunt:

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \mathbf{B} &= 0 \Longrightarrow \mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A}, - \operatorname{legea} fluxului \ magnetic \\ \mathbf{B} &= \bar{\mu} \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{M}_p \Longrightarrow \mathbf{H} = \bar{\mu}^{-1} \big( \mathbf{B} - \mu_0 \mathbf{M}_p \big) - \sigma \underbrace{(\mathbf{v} \times \mathbf{B})}_{= \mathbf{0}} - \operatorname{legea} \ de \ material \\ \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \mathbf{J} \Longrightarrow \operatorname{rot}(\bar{\mu}^{-1} \operatorname{rot} \mathbf{A}) - \sigma \underbrace{(\mathbf{v} \times \mathbf{B})}_{= \mathbf{0}} = \mathbf{J} + \operatorname{rot}(\bar{\mu}^{-1} \mu_0 \mathbf{M}_p) - \operatorname{legea} \ circuitului \ magnetic \end{aligned}$$
(2.1)

Utilizând potențialul magnetic vector, A, legea circuitului magnetic devine

$$\operatorname{rot} \frac{\operatorname{rot} \mathbf{A}}{\mu} = \mathbf{J} + \operatorname{rot} \frac{\mu_0 \mathbf{M}_p}{\mu}.$$
 (2.1a)

În analiza numerică a DC-LATM interesează inducția magnetică, **B**, în circuitul magnetic al motorului și caracteristica cuplu funcție de unghi, pe domeniul de lucru al DC-LATM (Capitolele 3 și 4). Cuplul electromagnetic,  $\mathbf{M}_0$  [Nm] este parametrul principal al DC-LATM și este calculat utilizând tensorul tensiunilor Maxwell [11, 12]

$$\mathbf{n}_1 \mathbf{T}_2 = -\frac{1}{2} \mathbf{n}_1 (\mathbf{H} \cdot \mathbf{B}) + (\mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{H}) \mathbf{B}^T, \qquad (2.2)$$

$$\mathbf{M}_0 = \oint_{\Sigma} (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) \times (\mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{T}_2) \mathrm{d}S, \qquad (2.3)$$

unde  $\mathbf{r}_{o}$  este raza în raport cu axa de rotație, iar  $\Sigma$  este frontiera.

#### 2.3. Probleme de transfer de căldură în DC-LATM

Modelul fizic reprezintă etapa în care se identifică legile (care descriu transferul de căldură în motoarele DC-LATM studiate) împreună cu mărimile fizice caracteristice.

#### 2.3.1. Model fizico - matematic

Transferul de căldură se realizează prin trei mecanisme: conducție termică (medii materiale), convecție termică (medii fluide) și radiație termică între suprafețele corpurilor.

#### Conducția termică

Ecuația conducției termice este (legea lui Fourier)

$$\mathbf{q}''_{cond} \stackrel{\text{\tiny def}}{=} -k\nabla T, \tag{2.4}$$

unde  $\mathbf{q''}_{cond}$  [W/m<sup>2</sup>] este viteza (rata) de transfer de căldură, *k* [W/mK] este conductivitatea termică,  $\nabla T$  [K/m] este gradientul de temperatură. Transferul de căldură prin conducție termică se realizează de la temperatura mai mare spre temperatura mai mică ( $T_1 > T_2$ ).

#### Convecția termică

Transferul de căldură dintre un corp solid și un fluid este dat de (legea lui Newton)

$$q_{conv}^{\prime\prime} \stackrel{\text{\tiny def}}{=} h(T_w - T_\infty), \tag{2.5}$$

unde  $T_w$  este temperatura termodinamică a suprafeței corpului solid,  $T_\infty$  este temperatura fluidului (rezervorului),  $q''_{conv}$  [W/m<sup>2</sup>] este fluxul termic convectiv, și h [W/m<sup>2</sup> K] este coeficientul de transfer termic convectiv.

#### Radiația termică

exprimă fluxul de căldură maxim la care radiația termică poate fi emisă de suprafața unui corp, numit radiator ideal sau corp negru (legea Stefan-Boltzamann) [11]

$$q_{SB}^{\prime\prime} = \sigma T_S^4, \tag{2.6}$$

unde  $T_S$  este temperatura absolută a suprafeței corpului și  $\sigma$  este constanta Stefan - Boltzamann ( $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \text{K}^4$ ).

Fluxul de căldură radiativ emis de o suprafață reală, "gri", este o fracție a celei emise de suprafața neagră

$$q_{SB,b}^{\prime\prime} = \varepsilon \sigma T_S^4, \qquad (2.7)$$

unde  $\varepsilon$  este emisivitatea.

#### Condiții de trecere (interfață) și la limită (frontieră)

Transferul de căldură în DC-LATM este produs prin *conducție termică, convecție termică și radiație termică*. Sunt elaborate și analizate modelele matematice pentru estimarea temperaturilor în înfășurările DC-LATM (sursă internă de căldură). Se consideră regimuri tranzitorii și staționare. Pentru DC-LATM sunt considerate modele 2D și 3D,  $T_{amb} = 22^{\circ}$ C și răcire prin convecție naturală

$$-\mathbf{n} \cdot (-k\nabla T) = h(T_{ext} - T), \qquad (2.8)$$

sau prin radiație față de mediul ambiant

$$-\mathbf{n} \cdot (-k\nabla T) = h(T_{inf} - T) + \varepsilon(G - \sigma T^4), \qquad (2.9)$$

$$(1-\varepsilon)G = J_0 - \varepsilon \sigma T^4, \qquad (2.10)$$

unde  $T_{inf}$  este temperatura de referință,  $\varepsilon$  este emisivitatea suprafeței,  $T_{amb}$  este temperatura ambientală,  $J_0$  [Wm<sup>-2</sup>] este radiozitatea suprafeței, G [W/m<sup>2</sup>] este iradiația mediului ambiant.

Informațiile prezentate în acest capitol sunt folosite în Capitolele 3, 4 și 5 în modelarea problemelor de câmp electromagnetic și transfer de căldură pentru DC-LATM studiate.

## CAPITOLUL 3 MODELAREA MOTOARELOR DE CURENT CONTINUU DE CUPLU CU UNGHI LIMITAT

#### 3.1. Introducere

În acest capitol au fost integrate modele numerice pentru DC-LATM folosindu-se Metoda Elementului Finit [25].

#### 3.2. Proiectarea DC-LATM-S

Acest tip de motor este în construcție "direct - drive". Au fost analizate două variante funcționale.

#### 3.2.1. Soluția constructivă 1

Soluția constructivă DC-LATM-S este prezentată în Fig. 3.1,a. În circuitul magnetic se folosesc materiale magnetice moi și dure pentru rotor și materiale magnetice moi pentru stator [4]. Problema de câmp magnetic este rezolvată pentru regimul staționar. S-a generat o rețea de discretizare ținând cont de geometria motorului, Fig. 3.2,a.



a) Domeniul de calcul.



b) Rețeaua de discretizare.



Figura 3.1, c prezintă inducția magnetică. Caracteristica cuplu – unghi este redată în Fig. 3.1, d.

### 3.2.2. Soluția constructivă 2

S-a realizat a doua soluție constructivă, DC-LATM-S – A (Fig. 3.2,a). În circuitul magnetic se folosesc aceleași materiale magnetice. Rețeaua de discretizare FEM este prezentată în Fig. 3.2,b.





Figurile 3.2, c și d prezintă inducția magnetică, respectiv caracteristica cuplu-unghi.

### 3.2.3. Modelarea tri-dimensională

S-a realizat analiza numerică tri-dimensională a DC-LATM-S considerând prima variantă a acestuia. Figura 3.3,a prezintă părțile constructive ale modelului utilizat în analiza numerică: (1) pachetul de tole stator; (2) înfășurarea statorului; (3) întrefierul, (4) magnetul, (5) arborele rotorului și (6) domeniul de aer. Se folosesc materialele prezentate în analiza numerică a modelului 2D. Se generează rețeaua de discretizare, Fig. 3.3,b.



Fig. 3.3. a) Domeniul de calcul al DC-LATM-S; b) Rețeaua de discretizare; c) Spectrul liniilor de câmp, max.1.37 T, min. 0 T; d) Caracteristica cuplu-unghi obținută din modelele 2D și 3D.

Figurile 3.3,c și d prezintă spectrul liniilor de câmp magnetic, respectiv caracteristicile cupluunghi. Abaterea valorii maxime a cuplului obținut în modelul 2D față de 3D este 21.03 %.

## 3.3. Motorul de curent continuu de cuplu, cu unghi limitat tip DC-LATM-CR

În acest subcapitol se analizează DC-LATM-CR, un motor cu două canale și care asigură rolul a două DC-LATM [4].

## 3.3.1. Modelarea bi-dimensională

Analizând diverse cazuri ale soluției constructive pentru acest tip de motor, rezultă soluția redată în Fig. 3.4,a. În construcția circuitului magnetic se folosesc materiale magnetice moi și dure pentru rotor și materiale magnetice moi pentru stator [4]. Problema de câmp magnetic este rezolvată pentru regimul staționar. S-a generat o rețea de discretizare ținând cont de geometria motorului, Fig. 3.4,a).



Fig. 3.4. a) Domeniul de calcul pentru DC-LATM-CR; b) Rețeaua de discretizare; c) **B**, max. 2.01 T, min. 0 T. d) Caracteristica cuplu-unghi.

Figura 3.4,c prezintă inducția magnetică. Pentru caracteristica cuplu-unghi din Fig. 3.4,d a fost realizat un studiu parametric relativ la unghiul poziției stator – rotor.

## CAPITOLUL 4 MOTOR DE CUPLU DE CURENT CONTINUU CU UNGHI LIMITAT TIP DC-LATM-CI-C

În acest capitol se prezintă analiza numerică pentru DC-LATM-CI-C. Acest motor are caracteristici constructive speciale - magneți auxiliari în axa interpolară. Într-o primă etapă, pentru analiza numerică se vor folosi aproximările 2D.

## 4.1. Modelul bi-dimensional al DC-LATM-CI-C

Ca prim pas al studiului numeric se stabilește domeniul fizic.

4.1.1. Varianta Fier-Siliciu pentru pachetul de tole (DC-LATM-CI-B)

În construcția circuitului magnetic se folosesc materiale magnetice moi și dure pentru rotor și materiale magnetice moi pentru stator [4]. Problema de câmp magnetic este rezolvată pentru regimul staționar. S-a generat o rețea de discretizare ținând cont de geometria motorului, Fig. 4.1,a.



Fig. 4.1. a) Domeniul de calcul considerat în modelarea numerică pentru DC-LATM-S; b) Rețeaua de discretizare; c) Inducția magnetică, max, 2.04 T, min. 0 T; d) Caracteristica cuplu-unghi.

Figurile 4.1,c și d prezintă inducția magnetică, respectiv caracteristica cuplu-unghi. Rezultatele obținute sunt puternic afectate de ipotezele simplificatoare. În acest caz este vorba de o problemă plan paralelă (se neglijează efectele de capăt).

# 4.1.1.1. Influența soluțiilor constructive ale rotorului asupra caracteristicii cuplu-unghi pentru DC-LATM-CI-B

Pornind de la soluția constructivă 1 s-au analizat diferite soluții constructive ale rotorului prin redimensionarea magneților auxiliari, Fig. 4.2.



În cadrul acestui studiu numeric, s-au folosit distanțieri realizați din Ol și Al.

Figurile 4.3,a și b prezintă inducția magnetică obținută pentru distanțierii din Ol și Al iar Fig. 4.3,c și d prezintă caracteristicile cuplu-unghi calculate pentru cele două variante.



Fig. 4.3. a) și b) Soluția electromagnetică obținută pentru simularea distanțierilor din Ol și Al; c) și d) Caracteristicile cuplu-unghi pentru variantele constructive cu distanțierii realizați din Ol și Al.

S-a realizat un studiu al caracteristicilor cuplu electromagnetic funcție de unghi. Se observă că soluția 5 are o caracteristică cuplu-unghi foarte apropiată de liniaritate. De asemenea, cuplul obținut pentru soluția 5 este mai ridicat în comparație cu soluția 0. Se concluzionează că varianta de evitat este aceea în care se folosește Al pentru distanțieri. Deși cuplul este mai mare, nu se obține o uniformitate a caracteristicii cuplu-unghi.

#### 4.1.2. Varianta Fier-Cobalt pentru pachetul de tole (DC-LATM-CI-C)

În urma rezultatelor studiului DC-LATM-CI-B s-a observat că porțiuni din stator s-au saturat. Astfel, se va folosi Fier - Cobalt (Fe-Co) pentru pachetul de tole - DC-LATM-CI-C.

Domeniul de calcul și rețeaua de discretizare pentru DC-LATM-CI-C folosită în studiul numeric sunt prezentate în Fig. 4.1,a și b.





Fig. 4.4. a) Inducția magnetică; b) Distribuția în întrefier a componentei normale a inducției magnetice; c) Caracteristicile cuplu-unghi pentru cele două modele considerate.

Figura 4.4,a prezintă inducția magnetică, valoare maximă 2.31 T. În Fig. 4.4,b este evidențiată distribuția componentei normale a inducției magnetice în întrefierul motorului, valoare maximă 0.79 T. Fig. 4.4,c prezintă caracteristicile cuplu – unghi ale DC-LATM cu jugul statoric construit din FeSi și FeCo, soluția 1. S-a calculat eroarea cuplului obținut în modelele cu FeSi (97 mN m) și FeCo (107.87 mN m) pentru pachetul de tole stator. Diferența dintre valorile cuplului este de 10.07 %.

# 4.1.2.1. Analiza soluțiilor constructive ale rotorului pentru caracteristica cuplu-unghi - DC-LATM-CI-C

Au fost analizate diferite soluții constructive ale rotorului prin redimensionarea distanțierilor și implicit a magneților auxiliari, Fig. 4.2. În cadrul acestui studiu numeric, s-au folosit distanțieri realizați din Ol și Al.

Figurile 4.5,a și b prezintă inducția magnetică pentru simularea distanțierilor din Ol și Al. Fig. 4.5,c și d evidențiază caracteristicile cuplu-unghi calculate pentru cele două variante.



a) **B** [T] pentru distanțierii din Ol, soluție 6.



b) **B** [T] pentru distanțierii din Al, soluție 6.



Fig. 4.5. a) și b) Soluția electromagnetică obținută pentru simularea distanțierilor din Ol și Al; c) și d) Caracteristicile cuplu-unghi pentru variantele constructive cu distanțierii realizați din Ol și Al.

Se observă că soluția 6 are o caracteristică cuplu-unghi foarte apropiată de liniaritate. Cuplul obținut pentru soluția 6 are o valoare mai ridicată comparativ cu soluția 1. Comparând, se concluzionează că varianta de evitat este aceea în care se folosește Al pentru distanțieri.

În cadrul secțiunilor 4.1.1.1 și 4.1.2.1 este prezentat studiul uniformității caracteristicilor cupluunghi pentru soluțiile constructive prezentate anterior. S-a calculat abaterea caracteristicii cuplu – unghi față de caracteristica ideală și față de caracteristica simetrică. În următoarele subcapitole, 4.1.2.2  $\div$  4.1.2.5 este prezentată această analiză.

#### 4.1.2.2. Distanțieri din Ol - Abaterea caracteristicii cuplu-unghi față de caracteristica ideală

În această secțiune se prezintă analiza comparativă a caracteristicii cuplu-unghi în raport cu caracteristica ideală prin determinarea regresiei simple liniare. Ecuația liniei de tendință liniară pentru cuplul obținut în urma modelării variantelor folosește metoda celor mai mici pătrate astfel încât

$$M = a + bu, (4.1)$$

unde M reprezintă cuplul soluției constructive, a reprezintă punctul în care linia de tendință intersectează axa y, b reprezintă panta liniei de tendință și u reprezintă poziția unghiulară.

Pentru evaluarea globală a modelului regresiei liniare simple, se determină coeficientul de corelație, R, folosind ecuația

$$R = \frac{n\left(\sum_{i=1}^{19} u_i M_i\right) - \left(\sum_{i=1}^{19} u_i\right)\left(\sum_{i=1}^{19} M_i\right)}{\sqrt{\left[n\sum_{i=1}^{19} u_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{19} u_i\right)^2\right]\left[n\sum_{i=1}^{19} M_i^2 - \left(M_i\right)^2\right]}},$$
(4.2)

în care n = 19 și reprezintă numărul valorilor pentru cuplu și poziția unghiulară pentru care se calculează linia de tendință.

În continuare, se exprimă ponderea cu care variabila independentă (poziția unghiulară), influențează semnificativ variația variabilei dependente (cuplul). Această evaluare se bazează pe analiza coeficientului de determinare  $R^2$ . În acest studiu, abaterea absolută față de caracteristica

ideală, d, este definită prin

$$d = M_{ideal} - M_{real}. \tag{4.3}$$

În acest studiu, abaterea relativă, față de caracteristica ideală,  $d_r$ , este definită prin

$$d_r = \frac{M_{real} - M_{ideal}}{M_{ideal}} \cdot 100, \qquad (4.4)$$

unde  $M_{ideal}$  este cuplul corespunzător caracteristicii ideale, iar  $M_{real}$  este cuplul relativ la caracteristica reală.

Această evaluare selectează soluțiile constructive 5 și 6 ale motorului. Pentru fiecare soluție constructivă a fost analizată regresia simplă liniară. Sunt prezentate rezultatele, inclusiv abaterile d și  $d_r$  față de caracteristica ideală. Acestea sunt mai mari pentru varianta 6 comparativ cu varianta 5. Se prezintă și caracteristica abatere absolută-unghi. În ambele cazuri (soluțiile constructive 5 și 6), abaterea maximă este la 45°. Pentru celelalte soluții constructive, abaterile arată depărtarea cuplurilor de liniaritate.

#### 4.1.2.3. Distanțieri din Ol - Abaterea caracteristicii cuplu-unghi față de caracteristica simetrizată

A fost calculată caracteristica simetrizată prin medierea valorilor cuplului care corespund unghiurilor simetrice,  $-\alpha$  și  $\alpha$ . În acest studiu, abaterile absolută  $d_s$  și relativă  $d_{rs}$ , sunt date de

$$d_s = M_{real} - M_{simetrie}, \qquad (4.5)$$

$$d_{rs} = \frac{d_s}{M_{real}},\tag{4.6}$$

unde  $M_{simetrie}$  este cuplul dat de caracteristica simetrizată, iar  $M_{real}$  este cuplul dat de caracteristica reală.

Sunt prezentate caracteristicile simetrizate pentru soluțiile constructive 5 și 6 și abaterile  $d_s$ ,  $d_{rs}$  față de caracteristica simetrizată. Este evidențiată caracteristica abatere absolută-unghi pentru soluțiile constructive 5 și 6. În ambele cazuri, abaterea este maximă la extrema caracteristicii (±45°) și minimă la centrul caracteristicii (0°).

#### 4.1.2.4. Distanțieri din Al - Abaterea caracteristicii cuplu-unghi față de caracteristica ideală

Sunt prezentate regresia simplă liniară și caracteristica ideală pentru soluțiile constructive 5 și 6 cu distanțieri din Al. În ambele cazuri se obțin valori ridicate ale cuplului, însă caracteristica cuplu-unghi se depărtează de liniaritate. Sunt prezentate și abaterile d și  $d_r$  față de caracteristica ideală. Valorile abaterilor relative sunt mai mari în cazul distanțierilor din Al pentru ambele soluții constructive. Caracteristica este căzătoare în intervalul [ $35 \div 45$ ]° datorită saturației (valori maxime ale abaterilor). Este reprezentată și caracteristica abatere absolută-unghi. În ambele cazuri (soluțiile constructive 5 și 6) abaterea maximă este la 45°.

#### 4.1.2.5. Distanțieri din Al - Abaterea caracteristicii cuplu-unghi față de caracteristica simetrizată

Sunt evidențiate caracteristicile simetrizate pentru soluțiile 5 și 6 și abaterile  $d_s$ ,  $d_{rs}$  față de caracteristica simetrizată și caracteristica abatere absolută-unghi. Abaterile față de caracteristica

simetrizată au valori maxime la marginile domeniului de lucru al motorului și scad pentru unghiuri spre 0°.

Prin redimensionarea magneților auxiliari rezultă o creștere a inducției magnetice cu reducerea unghiului dintre distanțieri. În cazul distanțierilor din Ol, caracteristicile cuplu-unghi se apropie de cea ideală pentru domeniul unghiular de lucru ( $-45 \div +45$  grade). Pentru distanțieri din Al rezultă un cuplu maxim mai mare, însă caracteristica cuplu-unghi se depărtează de liniaritate.

# 4.1.2.6. Studiul asupra analizei numerice a modelului bi-dimensional pentru motorul DC-LATM de tip DC-LATM-CI-C

Sunt analizate caracteristicile cuplu – unghi pentru primul model (inițial), modelul în care s-a folosit un mesh adaptiv, modelul cu mesh adaptiv în care s-a considerat un factor de umplere,  $k_u = 0.95$  și modelul experimental, Fig. 4.6.



Fig. 4.6. Comparația caracteristicilor cuplu-unghi pentru modelul 2D și experimental.

Concluziile analizei pot conduce la scăderea abaterii caracteristicii cuplu – unghi pentru modelul 2D comparativ cu caracteristica cuplu – unghi pentru modelul experimental.

În următorul sub-capitol se prezintă un model 3D al acestui motor.

## 4.2. Modelul tri-dimensional

Figura 4.7,a și b prezintă părțile constructive ale modelului și rețeaua de discretizare utilizate în analiza numerică. Se folosesc materialele prezentate în analiza numerică a modelului 2D. Figura 4.7,c prezintă harta de culoare a inducției magnetice. Datorită faptului că rezultatele sunt puternic influențate de rețeaua de discretizare au fost realizate teste de acuratețe, Fig. 4.4,d. Sunt reprezentate caracteristicile cuplu-unghi pe domeniul de lucru al motorului pentru modelul 3D. Pe domeniul  $-45^{\circ} \div 35^{\circ}$  valorile calculate ale cuplului sunt foarte apropiate de valorile măsurate. Pe domeniul  $40^{\circ} \div 45^{\circ}$  valorile scad și caracteristica este "căzătoare".



Fig. 4.7. a) Domeniul de calcul și condițiile pe frontieră; b) Rețeaua de discretizare; c) Inducția magnetică, max. 2.36 T, min. 0 T; d) Caracteristica cuplu-unghi obținută din modelele 2D și 3D.

## 4.2.1. Utilizarea elementelor finite de tip "infinit"

S-a realizat un studiu în care problema de câmp magnetic este închisă la distanță finită utilizând elemente finite de tip "infinit", Fig. 4.8,a. Rețeaua de discretizare este prezentată în Fig. 4.8,b.



a) Domeniul de calcul.



b) Rețeaua de discretizare.



Fig. 4.8. a) Domeniul de calcul pentru DC-LATM-CI-C; b) Rețeaua de discretizare folosită pentru domeniul de calcul; c) Harta de culoare a inducției magnetice; d) Caracteristica cuplu-unghi.

Figurile 4.8,c și d prezintă inducția magnetică, respectiv caracteristica cuplu funcție de unghi. Valorile cuplului pentru modelul 3D sunt apropiate de valorile măsurate.

Selecția DC-LATM se face în principal luând în considerare două criterii: uniformitatea caracteristicii cuplu-unghi pe domeniul de lucru și valoarea cuplului cerută de beneficiar (valoarea nominală), într-o gamă de  $\pm 10\%$ . Se consideră ca referință cuplul ideal, 74.8 mN m. Se va realiza o comparație între cuplurile măsurat și calculat în analiza numerică, modelul 3D.

Se prezintă caracteristica pe domeniul de lucru al motorului pentru modelul 3D, 3D cu elemente finite de tip infinit și experimental. Sunt calculate regresia simplă liniară, caracteristica ideală și abaterile absolută și relativă față de aceasta (d, respectiv  $d_r$ ). În toate cele trei cazuri se obțin valori ridicate ale cuplului și caracteristica se depărtează de liniaritate. Având în vedere caracteristica ideală care este constantă pe domeniul de lucru, valoarea cuplurilor calculate și măsurate prezintă abateri față de valoarea cuplului ideal. Din Fig. 4.8. d, reiese că, pe domeniul  $40^{\circ} \div 45^{\circ}$ , valorile calculate ale cuplului pentru modelul 3D scad și caracteristica devine "caracteristică căzătoare" din cauza saturației. Caracteristica cuplu-unghi pentru modelele 3D cu elemente infinite prezintă valori ale cuplului apropiate de valorile caracteristicii ideale exceptând domeniul  $40^{\circ} \div 45^{\circ}$ , unde valoarea mare a abaterii relative este dată de valoarea ridicată a cuplului (94.6 mNm). De asemenea, și modelul experimental prezintă abateri relative față de caracteristica ideală date de neuniformitatea caracteristicii cuplu-unghi pe domeniul de lucru.

Sunt evidențiate caracteristicile abatere absolută-unghi pentru cele trei modele și s-a calculat abaterea absolută. Se constată că toate modelele (numerice și experimental) prezintă abateri absolute față de modelul ideal.

## CAPITOLUL 5 MODELAREA TERMICĂ A UNUI MOTOR DE CUPLU DE CURENT CONTINUU CU UNGHI LIMITAT, DE TIP DC-LATM-CI-C

## 5.1. Introducere

Este prezentată analiza numerică pentru transferul de căldură în DC-LATM-CI-C. Acest tip de motor este construit în clasa F de izolație. Sunt folosite modele numerice 3D pentru analiza termică în regim staționar și tranzitoriu ale motorului prezentat. Sunt analizate diverse variante constructive ale acestui tip de motor pentru a îndeplini cerințele acestuia stabilite în *specificația tehnică*.

## 5.2. DC-LATM-CI-C montat într-un dispozitiv din inox nemagnetic – Varianta 1

S-a considerat DC-LATM-CI-C fixat în ansamblu, Fig. 5.1,a. Rețeaua de discretizare este prezentată în Fig. 5.1,b. Transferul de căldură se realizează prin conducție între motor și dispozitivul în care este montat și răcire prin convecție naturală la suprafața exterioară. În toate cazurile studiului numeric pentru DC-LATM-CI-C fixat în dispozitiv  $h = 10 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ .





Rezultatele studiului numeric pentru DC-LATM-CI-C prezintă distribuția temperaturii în motor în regim staționar, Fig. 5.1,c. Este evidențiată evoluția în timp a temperaturii și timpul în care temperatura din înfășurări ajunge la temperatura maximă admisă, Fig. 5.1,d.

## 5.3. DC-LATM-CI-C montat într-un dispozitiv din inox nemagnetic – Varianta 2

În cel de-al doilea caz studiat s-a considerat motorul fixat într-un ansamblu. Înălțimea și lățimea acestuia sunt cât motorul, Fig. 5.2,a. Rețeaua de discretizare folosită este prezentată în Fig. 5.2,b. Transferul de căldură se face prin conducție între motor și dispozitivul în care este montat și prin convecție naturală la suprafața exterioară. În toate cazurile studiului numeric pentru DC-LATM-CI-C fixat în dispozitiv  $h = 10 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ .



c) Distribuția temperaturii.



Fig. 5.2. a) Domeniul de calcul; b) Rețeaua de discretizare; c) Distribuția temperaturii.  $T_{max} = 138 \text{ °C} (roșu), T_{min} = 111 \text{ °C} (albastru); d)$  Distribuția temperaturii la t = 3000 s.  $T_{max} = 127 \text{ °C} (roșu), T_{min} = 107 \text{ °C} (albastru).$ 

Rezultatele studiului numeric pentru DC-LATM-CI-C prezintă distribuția temperaturii în motor în regim staționar, Fig. 5.2,c. Este repezentată evoluția în timp a temperaturii și timpul în care temperatura din înfășurări ajunge la temperatura maximă admisă, Fig. 5.2,d. Temperatura este mai scăzută în cel de-al doilea caz studiat.

## 5.4. DC-LATM-CI-C montat în carcasă

Au fost considerate mai multe analize numerice prin variația coeficientului de transfer de căldură prin convecție, h = (0...10) Wm<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup>. S-au evidențiat două cazuri de funcționare ale DC-LATM studiat, I = 1.33 A și I = 1 A.

## 5.4.1. Curentul DC-LATM: I = 1.33 A

Motorul este introdus într-o carcasă, Fig. 5.3,a. Transferul de căldură se face prin conducție între motor și dispozitivul în care este montat și prin convecție naturală la suprafața exterioară.



Fig. 5.3. a) Domeniul de calcul; b) Complet izolat. t = 8 min.  $T_{max} = 178$  °C (roșu),  $T_{min} = 169$  °C (albastru); c)  $h = 5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ . t = 8 min.  $T_{max} = 154$  °C (roșu),  $T_{min} = 145$  °C (albastru); d)  $h = 10 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ . t = 8 min.  $T_{max} = 137$  °C (galben),  $T_{min} = 127$  °C (roșu).

Rezultatele studiului numeric, Fig. 5.3,b – d, prezintă distribuția temperaturii în motor în regim tranzitoriu, complet izolat,  $h = 5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ,  $h = 10 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ , la t = 0, 6 și 8 min.

## 5.4.2. Curentul DC-LATM: I = 1 A

Transferul de căldură se face prin conducție între motor și dispozitivul în care este montat și prin convecție naturală la suprafața exterioară. Domeniul de calcul este prezentat în Fig.5.3,a.



a) Distribuția temperaturii.

b) Distribuția temperaturii.

c) Distribuția temperaturii.

Fig. 5.4. a) Complet izolat. t = 15 min.  $T_{max} = 186$  °C (galben),  $T_{min} = 176$  °C (mov); b) h = 9 Wm<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup>. t = 30 min.  $T_{max} = 162$  °C (galben),  $T_{min} = 153$  °C (portocaliu); c) h = 10 Wm<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup>. t = 30 min.  $T_{max} = 152$  °C (galben),  $T_{min} = 143$  °C (portocaliu)...

Rezultatele studiului numeric, Fig. 5.4,a – c, prezintă distribuția temperaturii în motor în regim tranzitoriu, complet izolat,  $h = 9 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ,  $h = 10 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ , la t = 15 și 30 min.

# 5.5. Rezultatele experimentale test termic DC-LATM-CI-C. Comparația rezultatelor numerice cu rezultatele experimentale

Temperatura din înfășurări a DC-LATM-CI-C a fost măsurată la diferite momente de timp. S-au considerat două cazuri diferite din punct de vedere al curentului DC-LATM-CI-C.

### 5.5.1. Curentul DC-LATM: I = 1 A

Figurile 5.5,a și c prezintă curbele temperaturii funcție de timp pentru rezultatele numeric și experimental. În Fig. 5.5,b și d sunt evidențiate curbele temperaturii maxime funcție de coeficientul de transfer de căldură prin convecție.



Fig. 5.5. a) și c) Graficele temperaturii funcție de timp pentru rezultatul numeric și experimental; b) și d) Graficul temperaturii maxime funcție de coeficientul de transfer de căldură prin convecție.

Dacă I = 1 A, modelul numeric cu  $h = 9 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  are valorile temperaturii funcție de timp cele mai apropiate de modelul experimental. Temperatura maximă scade cu creșterea coeficientului de transfer de căldură prin convecție.

#### 5.5.2. Curentul DC-LATM: I = 1.33 A

Dacă I = 1.33 A, modelul numeric cu  $h = 5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  are valorile temperaturii funcție de timp cele mai apropiate de modelul experimental (Fig. 5.5, d).

## CAPITOLUL 6. STUDIU PRIVIND ABORDAREA DC-LATM ÎN APLICAȚII PENTRU DIVERSE DOMENII – MATERIALE ȘI FLUX TEHNOLOGIC

Este prezentat un studiu referitor la DC-LATM pentru aplicații în domeniul militar și aerospațial. Rezultatele acestei analize sunt intrări în abordarea acestui tip de motor pentru aplicații de spațiu. Se prezintă fluxul tehnologic al DC-LATM. Acesta este următorul pas după stabilirea soluției numerice și primul stadiu în procesul de fabricație. Apoi se adaptează pașii de fabricare pentru domeniul de spațiu în acord cu cerințele de mediu ale aplicației motorului.

Fabricarea motorului se face pe componente, așa cum este evidențiat în schema fluxului tehnologic pentru DC-LATM. Primul pas este analiza criteriilor de alegere ale materialelor folosite. Aceasta se face funcție de nivelul de maturitate al produsului și de constrângerile domeniului de spațiu.

## 6.1. Specificații sau standarde

Sunt prezentate criteriile de alegere ale materialelor și proceselor: standarde, proceduri corespunzătoare aplicațiilor spațiale etc. și documente privind materialele și procesele.

## 6.2. Selectarea materialelor nevalidate pentru aplicații spațiale

Pentru materialele despre care nu există informații, dezvoltatorii trebuie să justifice selecția și utilizarea propusă pentru a obține aprobarea.

## 6.2.1. Achiziția materialelor

Sunt prezentate bazele de date identificate care combină date despre materiale din mai multe surse. Se clarifică modul de completare al listelor de materiale și procese precum și factorii aplicabili. Se explică și se prezintă diagrame privind alegerea materialelor (considerând sensibilitatea acestora din punct de vedere al mediului de lucru) și a proceselor esențiale folosite în fabricarea motorului, inclusiv cererea de aprobare pentru folosirea acestora.

Pentru domeniul de spațiu, secvența de fabricație și asamblare sunt documentate într-un flux de fabricație. La finalizarea etapelor din digramele prezentate, procesele critice și implicit componentele motorului vor fi calificate. Pentru a îndeplini condiția de trasabilitate, în teza de doctorat sunt prezentate componentele unui DC-LATM în cadrul fluxului tehnologic. La sfârșitul acestuia se obține DC-LATM, Fig. 6.1.





Fig. 6.1. DC-LATM-CI-C la finalul procesului tehnologic.

## CAPITOLUL 7. MOTOR DE CUPLU DE CURENT CONTINUU CU UNGHI LIMITAT – MODELE EXPERIMENTALE

Modelul experimental este supus unui set de măsurători și încercări DC-LATM [4, 28] (obținerea caracteristicii cuplu-unghi pe domeniul de lucru). Sunt prezentate standul de măsură pentru DC-LATM, datele măsurate de traductor și rezultatele obținute, Fig. 7.1,a-c.



Fig. 7.1. a) Standul de măsură pentru DC-LATM în momentul achiziției datelor; b) Datele măsurate de traductor; c) Caracteristica cuplu – timp pentru DC-LATM-CI – C; d) Comparația caracteristicilor cuplu-unghi pentru modelele numerice și experimental.

Valoarea maximă a cuplului este de aproximativ 94 mN m. Caracteristica nu este constantă și prezintă o anumită asimetrie față de axa cuplului. În aproximarea 2D, valorile cuplului sunt mai mari față de modelul experimental Fig. 7.1,d. Acest aspect reiese și din valorile erorii relative prezentate în teza de doctorat.

Folosind același stand de măsură s-au verificat caracteristicile unui alt DC-LATM din aceeași familie de motoare. S-au realizat măsurători ale cuplului și unghiului pentru DC-LATM-CI-D utilizând același traductor de cuplu cu traductor de unghi încorporat. Pentru curentul nominal al motorului I = 2.2 A, se obține un cuplu maxim egal cu 44 mN m. Această valoare este în acord cu cerința tehnică a DC-LATM. Valorile experimentale pot prezenta abateri față de valoarea nominală [4] cuprinse în intervalul  $\pm 10\%$ .

# CONCLUZII

## C.1. Concluziile generale

Cercetarea științifică a avut ca scop studiul DC-LATM, care prezintă un subiect de interes datorită construcției și aplicațiilor la care se folosește.

S-a prezentat modul de abordare în analiza unui motor DC-LATM (din punct de vedere al unei probleme bine formulate, a modelului fizic, a modelarii matematice și numerice).

Pentru calculul unor mărimi și caracteristici specifice DC-LATM au fost studiate diferite configurații pentru trei tipuri de DC-LATM, folosind modelarea numerică.

Modelele bi- și tridimensionale dezvoltate și prezentate au permis evaluarea mărimilor și a caracteristicilor pentru fiecare DC-LATM.

S-a ales un singur tip de DC-LATM și s-au realizat diverse studii privind utilizarea elementelor finite de tip "infinit".

A fost studiată influența soluțiilor constructive ale rotorului asupra caracteristicii cuplu-unghi.

S-au prezentat criteriile de selecție ale DC-LATM și prin considerarea unui cuplu ideal s-au comparat cuplul măsurat și cuplul calculat în analiza numerică, modelul 3D.

S-au prezentat regresia simplă liniară și caracteristica ideală pentru fiecare dintre modelele studiate și s-au calculat abaterea absolută, abaterea relativă și caracteristica abatere absolută-unghi.

Dezvoltarea modelelor numerice pentru evaluarea comportamentului termic al DC-LATM ales pentru studiu au dus la o caracterizare corectă a motorului din punct de vedere al funcționării.

Fluxul tehnologic, realizarea modelului experimental pentru DC-LATM ales pentru studiu și compararea caracteristicilor cuplu-unghi pentru modelele numerice și experimental completează cercetarea științifică derulată în cadrul studiilor doctorale.

## C.2. Contribuțiile originale

Contribuțiile personale la această lucrare sunt următoarele:

- Îmbunătățirea valorii parametrului principal al DC-LATM-CI-B şi DC-LATM-CI-C.
  S-a realizat prin studiul influenței soluțiilor constructive ale rotorului asupra caracteristicii cuplu-unghi pentru cele două motoare. S-au analizat diferite soluții constructive ale rotorului prin redimensionarea magneților de întărire a câmpului și prin folosirea a două tipuri de materiale pentru distanțieri, Ol şi Al.
- Calculul abaterii caracteristicii cuplu-unghi față de caracteristica ideală, simetrică și caracteristica abatere absolută-unghi pentru fiecare variantă prezentată - Definirea unui nou estimator precum și o nouă interpretare a statisticii respective.
- Analiza comportamentului termic al DC-LATM-CI-C.
  - Model conceptual al dispozitivelor în care motorul a fost integrat.
  - $\circ$  Realizarea unui experiment termic în care s-au considerat două cazuri diferite din punct de vedere al curentului DC-LATM: I = 1 A și I = 1.3 A. Măsurarea

temperaturii la diferite momente de timp (funcție de curent) și realizarea graficului temperaturii ( $T_{amb} = 22$  °C) funcție de timp.

- Conceperea diagramelor privind procesul pentru selecția și aprobarea materialelor, acceptarea materialelor, selecția și aprobarea proceselor și calificarea proceselor pentru componente.
- Conceperea schemei logice a standului de măsură pentru DC-LATM, achiziția și prelucrarea datelor măsurate de traductor pentru DC-LATM-CI-C și DC-LATM-CI-D.
  - Realizarea măsurătorilor de cuplu și unghi folosind traductorul de cuplu cu traductor de unghi încorporat, pentru I = 50%·I<sub>n</sub> A, I = 50%·I<sub>n</sub> și I = 50%·I<sub>n</sub> A, unde I<sub>n</sub> = 2.2 A. Realizarea graficelor cuplu și unghi în funcție de timp.

## C.3. Perspectivele de dezvoltare

Din concluziile prezentate anterior, anumite aspecte necesită investigații suplimentare și noi. Prin aceste analize se obține o înțelegere profundă și o abordare completă a studiului comportamentului DC-LATM. Cercetarea științifică derulată și rezultatele obținute reprezintă date de intrare pentru viitoare analize. Sunt considerate următoarele direcții de dezvoltare ulterioară:

- Completarea studiului referitor la comportarea motoarelor de tip DC-LATM în aplicații de spațiu din punct de vedere termic. Se vor considera analize numerice în care transferul de căldură cu exteriorul se va face folosind radiație și conducție.

Condițiile speciale de funcționare și aplicațiile în care DC-LATM se folosesc impun studii numerice ale câmpului termic. Studiile numerice sunt esențiale în etapa de dezvoltare pentru definirea comportamentului motorului în diverse condiții de funcționare. În domeniul de spațiu determinarea comportamentului DC-LATM în lipsa oricărei surse de răcire este esențială. Vor fi considerate analize numerice în care transferul de căldură se va realiza doar prin conducție și radiație.

- Studiu numeric al solicitărilor termice și mecanice pentru DC-LATM.

În funcționarea motoarelor de tehnică specială, solicitările termice și mecanice sunt extrem de importante. De aceea, studii numerice pentru aceste motoare se doresc a fi realizate pentru a le asigura buna funcționare în medii cu condiții dificile și fiabilitate mare.

- Studiul unui motor ales pentru o aplicație de spațiu. Acesta presupune mod de proiectare, analiza comportamentului motorului în condiții de spațiu și parcursul acestuia de la prototip până la model calificat.

# ANEXA A1 – FORMA GENERALĂ PENTRU CÂMPUL MAGNETIC

În cadrul Capitolului 2, subcapitolul 2.2, secțiunea 2.2.1, a fost prezentată forma redusă pentru câmpul magnetic, aplicabilă în cadrul problemei studiate, studiul DC-LATM. Sunt prezentate studiul și forma generală a câmpului magnetic, legea circuitului magnetic, legea fluxului magnetic și teoremele generale ale câmpului electromagnetic – Teorema impulsului electromagnetic.

## ANEXA A2. NIVELURI TRL

Nivelurile de maturitate tehnologică.

## ANEXA A3. STANDARDE ESA - SELECȚIE

Standardele ESA conform cărora se aleg materialele și procesele.

## ANEXA A4. LISTA DE MATERIALE SPACEMATDB - SPACE MATERIALS DATABASE

Lista materialelor din baza de date SPACEMATDB.

## ANEXA A5. MATERIALE FOLOSITE ÎN APLICAȚIILE PENTRU SPAȚIU ȘI RELEVANȚA PARAMETRILOR PENTRU SPAȚIU ASUPRA SELECȚIEI DE MATERIALE

Materialele folosite în aplicațiile pentru spațiu și relevanța constrângerilor domeniului de spațiu asupra selecției de materiale.

## ANEXA A6. LISTĂ DE MATERIALE – DML

Aspecte legate de lista de materiale (codul de mediu, de mărime și starea de aprobare).

## ANEXA A7. LISTA DE PROCESE - DPL

Starea de aprobare a listei de procese.

# ANEXA A8. ETAPELE PROCESULUI TEHNOLOGIC ALE UNUI DC-LATM

Etapele procesului tehnologic ale unui DC-LATM.

#### **BIBLIOGRAFIE**

- [1] R. Măgureanu, Mașini electrice speciale pentru sisteme automate, Editura Tehnică, București, 1981.
- [2] Moog Catalogue, Direct Drive Brushless DC Torque Motors, 2013.
- [3] Precilec Catalogue, Permanent magnet generators and motors, 2013.
- [4] Icpe Catalogue, Special Electric Machines, 2019.
- [5] BENTAL Motion Systems, "Brushless Motors", 2013.
- [6] *R. Obreja, I.R. Edu*, "Limited Angle Torque Motors having high torque density, used in accurate Drive Systems", in Acta Polytechnica, Vol. 51, Nr. 5, 2011, pp.75-83.
- [7] M.I. Andrei, N.M. Modreanu, Modelarea numerică a unui motor de cuplu cu unghi limitat cu două canale, [Numeric Modelling of a Two-Channel Limited Angle Torque Motor], in EEA – Electrotehnică, Electronică, Automatică, Editura. ELECTRA, Vol. 62, Nr. 1, 2014, pp. 26-31.
- [8] C. I. Mocanu, Teoria câmpului electromagnetic, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1984.
- [9] www.motioncontroltips.com
- [10] A. M. Morega, Surse de energie. Note de curs, Facultatea de Electrotehnică, Universitatea POLITEHNICA din București, 2018 2019.
- [11] A.M. Morega, J.C. Ordonez, J.V.C. Vargas, S. Kosaraju, "A Finite Element Method Analysis and Optimization of a Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell with Interdigitated Flow Field Design", International Journal of Energy Technologies and Policy (IJETP), Special Issue: Computational Fluid Dynamics Simulations in Energy Technologies and Processes.
- [12] Icpe, Componente electromecanice pentru sisteme high-tech direct drive realizate cu linii tehnologice flexibile – HTDD, etapa I, Oct. 2013, <u>http://www.icpe.ro/htdd/ro</u>.
- [13] Icpe, Componente electromecanice pentru sisteme high-tech direct drive realizate cu linii tehnologice flexibile – HTDD, etapa II, Oct. 2013, <u>http://www.icpe.ro/htdd/ro</u>.
- [14] A. Popescu, Elemente Fundamentale de transfer de căldură, Editura Eurobit, Timișoara, 2003.
- [15] O.C. Zienkiewicz, The Finite Element Method. McGraw-Hill, 1977.
- [16] *M. Blumenfeld*, Introducere în metoda elementelor finite, Ed. Tehnică, 1995.
- [17] *D. Gârbea*, Analiză cu elemente finite, Ed. Tehnică, 1990.
- [18] Ş. Maksay, D. Bistrian, Introducere în metoda elementelor finite, ISBN 978-973-667-324-5, Iași, 2007.
- [19] M. Modreanu, A. Morega, "Analiza numerică a fenomenelor electromagnetice si termice într-un motor de curent continuu de mică putere", [Numerical Analysis of the Electromagnetic and Thermal Phenomena in a DC Motor of Low Power], în Sesiunea omagială de comunicări ştiințifice "55 de ani de activitate a Grupului ICPE în dezvoltarea sectorului electrotehnic", Bucureşti, 20–21 Sept. 2005.
- [20] M. Modreanu, M. Morega, "Evaluarea numerică și experimentală a unui motor de curent continuu cu magneți permanenți [Numerical and Experimental Evaluation of a DC Motor with Permanent Magnets]", in Simpozionul Actualități și Perspective în domeniul mașinilor electrice, Ediția a V-a, Universitatea POLITEHNICA din București, Catedra de Mașini, Acționări și Materiale, ISSN 1843-5912, 13–14 oct. 2009.
- [21] T. Tudorache, M. Morega, "Calculul 3D al încălzirii unui motor de c.c. de mică putere folosind metoda elementului finit [The 3D Calculation of Heating a DC Motor Low Power using the Finite Element Method]", in Simpozionul Actualități și Perspective în domeniul mașinilor electrice, Ediția a V-a, Universitatea POLITEHNICA din București, Catedra de Mașini, Acționări și Materiale, ISSN 1843-5912, 13–14 oct. 2009.
- [22] O. Craiu, A. Machedon, "3D Finite Element Thermal Analysis of a Small Power PM DC Motor–Optim", in 12th International Conference on Optimization of Electric and Electronic Equipment, Brasov, 20-22 mai 2010.
- [23] O. Craiu, A. Machedon, "Modele electromagnetice şi termice pentru servomotoare de c.c. cu magneți permanenți [Electromagnetic and Thermal Models for DC Servomotors with Permanent Magnets]", in Tendințe de dezvoltare în fabricația maşinilor electrice şi cerințe actuale ale UE, Universitatea POLITEHNICA din Bucureşti, 15 Apr. 2010.
- [24] O. Craiu, M. Modreanu, "Studiu experimental şi numeric al încălzirii unui motor de c.c. de mică putere, în condiții variate de funcționare [Experimental and Numerical Study of Heating of a DC Motor of Low Power, under Varied Operating Conditions]", Simpozionul de maşini electrice SME 2010, Bucureşti, 7 –

8.10.2010.

- [25] *J.-M. Jin*, "The Finite Element Method in Electromagnetics", in John Wiley and Sons Publisher, New York, 2002.
- [26] I. Ionică, M. Modreanu, A. Morega, "Numerical Studies on a DC, Limited Angle, Torque Motor" in SIELMEN 2015 – Proceedings of the 10th International Conference on Electromechanical and Power Systems, Editura. ALMA, Chişinău, 8-9 Oct. 2015, pp 249-255.
- [27] Comsol Multiphysics, <u>www.comsol.com</u>.
- [28] M.I. Andrei, N.M. Modreanu, M. Guţu, L. Ghiţulescu, "Sistem de măsură asistat de calculator pentru caracterizarea motoarelor de cuplu cu unghi limitat" [Computer Aided Measurement System for the Caracterization of Limited Angle Torque Motors], in EEA - Electrotehnică, Electronică, Automatică, Editura. ELECTRA, Vol. 62, Nr. 3, ISSN 1582-5175, Iun-Sept 2014.
- [29] *M. Morega*, Mașini și acționări electrice. Note de curs, Facultatea de Electrotehnică, Universitatea POLITEHNICA din București, 2007.
- [30] D. Stoia, Excited DC motors with permanent magnets, Editura Tehnică, București 1983.
- [31] P.R. Upadhyay, K.R. Rajagopal, B.P. Singh, "Computer aided design of an axial-field permanent magnet brushless dc motor for an electric vehicle", in Journal of Applied Physics, Vol. 93, nr.10, Mai 2003, pp.8689-8691.
- [32] P.R. Upadhyay, K.R. Rajagopal, "FE Analysis and Computer-Aided Design of a Sandwiched Axial-Flux Permanent Magnet Brushless DC Motor," in IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 42, nr.10, Oct. 2006, pp.3401-3403.
- [33] P.R. Upadhyay, K.R. Rajagopal, "FE analysis and CAD of radial-flux surface mounted permanent magnet brushless DC motors", in Digests of the IEEE International Magnetics Conference -INTERMAG Asia 2005, 4–8 Aprilie 2005, pp.729-730.
- [34] *R. Obreja, I.R. Edu*, "Limited Angle Torque Motors having high torque density, used in accurate Drive Systems", in Acta Polytechnica, **Vol.** 51, Nr. 5, 2011, pp.75-83.
- [35] C. Ghiță, Elemente fundamentale de mașini electrice, Editura PRINTECH, București, 2002.
- [36] *M.I. Andrei, M. Modreanu, L. Ghițulescu*, "ACES Methodology for a DC Limited Angle Torque Motor", in Revue roumaine des sciences techniques, Série Électrotechnique et Énergétique.
- [37] D. Meeker, User's Manual for Finite Element Method Magnetics FEMM, ver. 4.2, Oct. 2010.
- [38] N. Vasile, Ingineria Electrică Probleme actuale, Editura Electra, București, 2010.
- [39] A. Hemeida, P. Sergeant, "Analytical modeling of surface PMSM using a combined solution of Maxwell's equations and magnetic equivalent circuit", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 50, 12, art. 7027913, 2014.
- [40] A. Boglietti, A. Cavagnino, D.A. Staton, "Thermal Analysis of TEFC Induction Motors", Proc. of IEEE International Conference PEDS 2003, Singapore, 2003.
- [41] A. Boglietti, A. Cavagnino, M. Lazzari, M. Pastorelli, "A simplified thermal model for variable-speed self-cooled industrial induction motor", IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 39, Issue 4, 2003, pp. 945 – 952.
- [42] A. Cassat, C. Espanet, N. Wavre, "BLDC motor stator and rotor iron losses and thermal behavior based on lumped schemes and 3-D FEM analysis", IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 39, Issue 5, 2003, pp. 1314 – 1322.
- [43] *E. Lebenhaft*, "Field Evaluation of Slip-Dependent Thermal Model for Motors with High-Inertia Starting", Petroleum and Chemical Industry Technical Conference, 2007. PCIC '07, pp. 1 5, 2007.
- [44] *H.P. Liu, V. Lelos, C.S. Hearn*, "Transient 3-D thermal analysis for an air-cooled induction motor", Proc. of IEEE International Conference IEMDC 2005, 2005, pp. 417 420.
- [45] *R. Bernard, R. Glises, D. Chamagne*, "3D thermal study of a low power electric motor with Flux3D", Flux-Magazine, No. 37, 2001, pp. 10 11.
- [46] *T. F. Pirious, A. Razek*, "Finite element analysis in electromagnetic systems accounting for electric circuits," IEEE Trans on Magnetics, **Vol**.29, No.2, March 1993, pp.1669-1675.
- [47] P. B. Zhou, "Numerical analysis of electromagnetic fields," Springer-Verlag, 1993.
- [48] M. C. Leu, R. A. Aubrecht, "Feasible and Optimal, Designs of Variable Air gap Torque Motors" Journal

of Engineering for Industry, ASME, 1991.

- [49] A. G. Mikerov, "Brushless DC torque motors quality level indexes for servo drive applications", EUROCON'09 IEEE, 2009.
- [50] *Y. Zhang*, "High Performance DSP based Servo Drive, Control for a Limited Angle Torque Motor" Thesis at Loughsborough University, England, 1997.
- [51] Z. Jibin, Y. Guodong, X. Yongxiang, C. Xia, L. Yong, and W. Qian, Development of a Slotless Limited-Angle Torque Motor for Reaction Wheels Torque Measurement System, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol. 50, No. 11, November 2014.
- [52] N. Z. Reza, M. Mojtaba and A. Cavagnino, Analysis, Optimization, and Prototyping of a Brushless DC Limited-Angle Torque-Motor with Segmented Rotor Pole Tip Structure, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, Vol. 62, No. 8, August 2015.
- [53] *H. I. Lee and M. D. Noh*, "Optimal design of radial-flux toroidally wound brushless dc machines," IEEE Trans. Ind. Electron., **Vol.** 58, no. 2, Feb. 2011, pp. 444–449.
- [54] *M. F. Hsieh and Y. C. Hsu*, "A generalized magnetic circuit modeling approach for design of surface permanent-magnet machines," IEEE Trans. Ind. Electron., **Vol.** 59, no. 2, Feb. 2012, pp. 779–792.
- [55] C. C. Tsai, S. C. Lin, H. S. Huang, and Y. M. Cheng, "Design and control of a brushless dc limited-angle torque motor with its application to fuel control of small-scale gas turbine engines," Mechatronics, Vol. 19, no. 1, Feb. 2009, pp. 29–41.
- [56] *R. Nasirizarandi, H. M. Kelk, F. Toorani, and H. Farahmandzad*, "Comprehensive design of a toroidallywound limited angle torque motor," Int. Rev. Elect. Eng., **Vol**. 6, no. 1, Feb. 2011, pp. 198–206.
- [57] C. Dawson and H. R. Bolton, "Performance prediction of a wide-angle limited-motion rotary actuator," Proc. Inst. Elect. Eng., Vol. 125, no. 9, Sep. 1978, pp. 895–898.
- [58] *P. M. Krishna and N. Kannan*, "Brushless dc limited angle torque motor," in Proc. IEEE Int. Conf. Power Electron., Drives Energy Syst. Ind. Growth, New Delhi, India, 1996, pp. 511–516.
- [59] G. Bramerdorfer, S. M. Winkler, M. Kommenda, G. Weidenholzer, S. Silber, G. Kronberger, M. Affenzeller, W. Amrhein, "Using FE calculations and data-based system identification techniques to model the nonlinear behavior of PMSMs," IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 61, no. 11, Nov. 2014, pp. 6454–6462.
- [60] P. Hekmati and M. Mirsalim, "Design and analysis of a novel axial flux slotless limited-angle torque motor with trapezoidal cross section for the stator," IEEE Trans. Energy Convers., Vol. 28, no. 4, Dec. 2013, pp. 815–822.
- [61] *C. Dawson and H. R. Bolton*, "Design of a class of wide-angle limited-rotation rotary actuators," Proc. Inst. Elect. Eng., **Vol.** 126, no. 4, Apr. 1979, pp. 345–350.
- [62] *Y. Zhang*, I.R. Smith, J.G. Kettleborough, "Performance evaluation for a limited-angle torque motor," IEEE/ASME Trans. Mechatronics, **Vol.** 4, no. 3, Sep. 1999, pp. 335–339.
- [63] *C. R. Tufts*, "Selecting the correct magnetic material," in Proc. IEEEEEIC/ ICWA, Chicago, IL, USA, 1995, pp. 65–68.
- [64] *G. P. Widdowson* et al., "Computer-aided optimization of rare-earth permanent magnet actuators," in Proc. IET Int. Conf. Comput. Electromagn., London, U.K., 1991, pp. 93–96.
- [65] M. Roohnavazfar, M. Houshmand, R. Nasirizarandi, and M. Mirsalim, "Optimization of design parameters of a limited angle torque motor using analytical hierarchy process and axiomatic design theory," Prod. Manuf. Res., Vol. 2, no. 1, May 2014, pp. 400–414.
- [66] *J. Pyrhonen, T. Jokinen, and V. Hrabovcová*, "Design of rotating electrical machines," in Front Matter. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2008.
- [67] V. N. Mittle and A. Mittal, Design of Electrical Machines. New Delhi, India: N.C. Jain, 2002.
- [68] *Li Y. X., Wang T., Zhang W.*, Dynamic Performance Analyze of Swing Angle Torque Permanent Magnet Motor under Different Structure and Winding Parameters, Proceeding of the 2015 IEEE International Conference on Information and Automation Lijiang, China, August 2015.
- [69] *K. J. Binns, P. J. Lawrenson, and C. W. Trowbridge*, The Analytical and Numerical Solution of Electric and Magnetic Fields. Wiley, 1994.
- [70] https://ecss.nl/
- [71] <u>http://www.rosa.ro/index.php/en/</u>

- [72] I. Ionică, M. Modreanu, A. Morega, C. Boboc Studii numerice pentru maşini electrice speciale de tipul motoarelor de cuplu cu unghi limitat, EEA – Electrotehnică, electronică și automatică, revistă indexată în 6 baze de date internaționale, cotată B+ de CNCSIS; vol. 64, nr. 3, Articolul 2, Iulie-Septembrie 2016, Editura ELECTRA, 2016, pp. 12-19, ISSN: 1582-5175.
- [73] I. Ionică, M. Modreanu, A. Morega, C. Boboc Design and Modeling of a Hybrid Stepper Motor, The 10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering, Bucharest, România, March 23-25, 2017, pp.192-195, ISBN: 978-1-5090-5160-1.
- [74] I. Ionică, M. Modreanu, A. Morega, C. Boboc Numerical analysis of a hybrid stepper motor for the electromagnetic torque calculation, The 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering, Bucharest, România, March 28-30, 2019, pp.1-6, ISBN: 978-1-7281-0101-9/19/\$31.00 ©2019 IEEE.
- [75] I. Ionică, M. Modreanu, A. Morega, C. Boboc DC Limited Angle Torque Electrical Motor, Scientific Bulletin of University "Politehnica" of Bucharest, 2019, series C, Electrical Engineering and Computer Science, No. 1, Vol. 81, Iss. 1, pp.193-202, ISSN 2286-3540.
- [76] I. Ionică, M. Modreanu, A. Morega, C. Boboc Magnetic field models for a dc, torque motor, Buletinul Institutului Politehnic din Iași, Secția Electrotehnică, Energetică și Electronică, 2015, Fasc. 4, Tomul LXI (LXV), Editura Politehnium, pp. 53-60, ISSN: 1223-8139.
- [77] I. Ionică, M. Modreanu, A. Morega, C. Boboc Studii de câmp electromagnetic și termic pentru mașini electrice speciale, Actualități și perspective în domeniul mașinilor electrice, University POLITEHNICA of Bucharest, Faculty of Electrical Engineering, Department of Electrical Machines, Materials and Drives, București, România, 2019, ISSN / ISSN-L: 1843-5912, https://www.doi.org/10.36801/apme.2019.1.13.
- [78] I. Ionică, M. Modreanu, A. Morega, C. Boboc Tridimensional modeling for a dc, limited angle, torque motor of size 16th, International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering, Iaşi, România, October 20-22, 2016, pp. 235-239, ISBN: 978-1-5090-6129-7/16/\$31.00 ©2016 European Union.
- [79] I. Ionică, Ş. Tănase, I.-M. Nicola, C.-B. Oprea, A.-C. Covrig, A.-C. Stancu Icpe, a Worldwide Brand and Best Romanian Electric Motor Developer and Manufacturer for High-tech Industry and Space, Actualități și perspective în domeniul mașinilor electrice, University POLITEHNICA of Bucharest, Faculty of Electrical Engineering, Department of Electrical Machines, Materials and Drives, București, România, 2019, ISSN / ISSN-L: 1843-5912, https://www.doi.org/10.36801/apme.2019.1.16.