

## STUDII DE CÂMP ELECTROMAGNETIC ȘI TERMIC ÎN MOTOARE ELECTRICE REDUNDANTE

Ioana IONICĂ<sup>1,3</sup>, Mircea MODREANU<sup>1</sup>, Alexandru M. MOREGA<sup>2,3</sup>, Cristian BOBOC<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ICPE, București, România

<sup>2</sup>Universitatea Politehnica din București, Facultatea de Inginerie Electrică, București, România

<sup>3</sup>Universitatea Politehnica din București, Școala Doctorală de Inginerie Electrică, București, România  
ioana.messico@icpe.ro, mircea.messico@icpe.ro, amm@iem.pub.ro, cristianboboc.messico@icpe.

**Rezumat.** Această lucrare își propune analiza electromagnetă și termică pentru un motor de cuplu cu unghi limitat cu două canale, folosind modele numerice tri-dimensionale. Motorul de cuplu cu unghi limitat cu două canale pe care îl prezentăm în cadrul lucrării, spre deosebire de motorul de cuplu clasic, asigură rolul a două motoare de cuplu cu unghi limitat. Reprezintă o soluție destinată aplicațiilor pentru care performanțele funcționale ridicate, dimensiunile de gabarit, greutatea și siguranța în funcționare sunt critice. În proiectare se va folosi analiza numerică în vederea stabilirii unei soluții constructive optime din punct de vedere al tuturor cerințelor motorului stabilite în Specificația Tehnică.

### 1. INTRODUCERE

Motoarele de cuplu cu unghi limitat (DC-LATM) se dezvoltă și se comercializează în țară [1] și în străinătate [2–5]. Aceste motoare fac parte din categoria motoarelor de curent continuu fără perii care se deosebesc de mașinile electrice clasice prin construcție, caracteristici (în regim staționar și dinamic) și aplicațiile la care se folosesc și în care mașinile clasice nu pot funcționa din cauza condițiilor (de exemplu imersate complet în apă). De asemenea, DC-LATM sunt montate direct pe arborele de acționare și sunt destinate aplicațiilor care necesită rotirea într-un anumit domeniu unghiular [4].

DC-LATM prezintă un cuplu de agățare magnetică foarte redus și performanțele funcționale ridicate le recomandă pentru acționări cu unghi limitat [5]. Datorită lipsei creștăturilor în stator, cuplul de agățare magnetică este redus practic la zero. Prin urmare, se obține o caracteristică cuplu-unghi uniformă pe domeniul de lucru.

DC-LATM este dezvoltat pentru aplicații în care rotirea pe un anumit domeniu unghiular este principala cerință. Aceste motoare sunt proiectate în așa fel încât să funcționeze în construcția direct-drive (sunt montate direct pe axul de acționare). Astfel, cuplajele elastice și reductoarele nu mai sunt necesare. DC-LATM sunt construite pentru a produce un cuplu printr-un unghi de rotație mai mic de 180 de grade și prezintă avantaje semnificative în aplicațiile menționate comparativ cu motoarele de cc fără perii, dar fără costuri mai mari. Sunt utilizate pe scară largă pentru transmisiile optice de scanare în nave spațiale, pentru a acționa supape servo, pentru a poziționa antenele, pentru a acționa brațele robotului și pentru a conduce alte sisteme care se rotesc în unghiuri mici. Principalele avantaje ale acestei construcții sunt:

- montare directă pe axul principal;
- raport mare: cuplu [Nm] / moment inerție[kg.m<sup>2</sup>];
- raport mare: cuplu mecanic util [Nm]/ putere utilă [W];
- constanta electrică de timp [ms] mică;
- funcționare fără zgomot și vibrații – în majoritatea cazurilor, acest tip de motoare, DC-LATM, se cer în construcție direct-drive. Astfel, nu avem vibrații mecanice de la rulmenți.
- construcție simplă, dar solidă.

Datorită numeroaselor avantaje prezentate anterior, DC-LATM sunt folosite în aplicații de tehnică specială (domeniu de apărare, aerospațial) și apar în gama de oferte a numeroși producători de motoare. Configurațiile disponibile sunt diverse, soluția constructivă aleasă variind în funcție de aplicația necesară clientului.

Acest tip de motor este cu două canale și asigură rolul a două motoare de c.c. de cuplu, cu unghi limitat [6]. Este în construcție “direct - drive” (arborele acestui motor este construit pentru acționare directă) și este destinat aplicațiilor pentru care performanțele funcționale ridicate, gabaritul, greutatea, fiabilitatea și siguranța în funcționare sunt critice. Pentru atingerea performanțelor funcționale ale produsului cerute de aplicațiile din domeniul aeronautic, s-a ales realizarea unui DC-LATM cu două canale.

Sursele de câmp electromagnetic și de căldură din acest DC-LATM sunt înfășurarea statorică parcursă de curent și magneții permanenți pe bază de pământuri rare, situați pe rotor.

Subsablul stator al DC-LATM studiat este construit din două pachete de tole de formă toroidală fără creștături, care sunt executate din tablă electrotehnică de tip FeSi având grosimea de 0.35 mm. De asemenea, pachetele stator sunt prevăzute cu o înfășurare în inel, multistrat, cu  $2p = 2$  poli. Statorul astfel realizat care conține miezul feromagnetic și bobinele de excitație și bobinele de excitație se montează într-o carcasă din oțel inoxidabil și se înglobează în rășină epoxidică [6].

Subsablul rotor al acestui DC-LATM este construit din două rotoare identice cu  $2p = 2$  poli. Fiecare rotor din cele două menționate anterior include doi magneți permanenți din pământuri rare care formează polii (rotorul are același număr de perechi de poli ca și statorul,  $2p = 2$  poli) și arborele construit pentru acționare directă (direct-drive). Rotorul este obținut prin procesul de fixare prin lipire a magneților permanenți pe bază de pământuri rare de tip NdFeB (cu formă și dimensiuni identice), caracterizați de inducții remanente între  $1.1 \div 1.3$  T [6–8] pe arborele motorului confecționat din oțel feromagnetic tip 416. Magneții aceluiași rotor sunt de polarități diferite.

Cerințele motorului date de aplicația în care acesta este folosit vor stabili datele de intrare ale problemei de câmp electromagnetic și de transfer de căldură.

Analiza de câmp electromagnetic și de transfer de căldură abordate în această lucrare stabilesc comportamentul DC-LATM din punct de vedere electromagnetic și termic [9 – 14, 16 – 22].

## 2. MODELUL MATEMATIC

Metoda cea mai utilizată pentru evaluarea comportamentului electromagnetic și termic al mașinilor electrice se bazează pe modelele numerice tri-dimensionale. Analiza numerică se va realiza cu ajutorul unui pachet de programe care are la bază metoda elementului finit [9 – 12]. Folosind modelarea numerică, se pot evalua cu precizie ridicată diferite configurații pentru o mașină electrică, însă fără a se mai realiza modelul experimental. Astfel, se reduce la minimum numărul modelelor fabricate în faza de prototipizare, ceea ce reprezintă un avantaj economic deoarece se reduc costurile.

Această lucrare prezintă analiza, dezvoltarea și prezentarea modelelor numerice tridimensionale pentru un motor de cuplu de curent continuu cu unghi limitat cu două canale. Folosind analiza numerică, se va analiza comportamentul acestui motor din punct de vedere electromagnetic și termic, având un curent maxim de 2 A.

Ca prim pas al studiului numeric, se stabilește domeniul fizic care include părțile constructive ale motorului, importante din perspectiva câmpului electromagnetic. Software-ul folosit pentru realizarea modelării numerice permite evaluarea pentru variante diferite din punct de vedere constructiv pentru a evalua îndeplinirea cerințelor stabilite în specificația tehnică a motorului.

Modelele tri-dimensionale pentru ambele probleme consideră anumite ipoteze simplificatoare:

- material masiv pentru pachetul statoric;
- material masiv pentru bobinaj;
- bobinaj neînglobat în rășină.

Problema de câmp magnetic este rezolvată pentru regimul staționar, definit de

1) Legea circuitului magnetic (legea lui Ampere)

$$\text{rot } \mathbf{B} = \mathbf{J}. \quad (1)$$

2) Legea fluxului magnetic (legea lui Gauss pentru magnetism)

$$\text{div } \mathbf{B} = 0. \quad (2)$$

3) Relația constitutivă de material

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} + \mathbf{B}_r, \quad (3)$$

unde  $\mathbf{H}$  [A/m] este intensitatea câmpului magnetic,  $\mathbf{J}$  [A/m<sup>2</sup>] este densitatea de curent,  $\mathbf{B}$  [T] este inducția magnetică,  $\mathbf{B}_r$  [T] este inducția magnetică remanentă,  $\mu_0$  este permeabilitatea magnetică a vidului iar  $\mu_r$  permeabilitatea magnetică relativă.

Inducția este câmp solenoidal, astfel, conform ecuației (4), se va folosi formularea în potențial magnetic vector  $\mathbf{A}$  [T/m]

$$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}. \quad (6)$$

Bobinele se definesc prin curentul injectat, aria secțiunii conductorului și numărul de spire, excitarea acestora făcându-se prin densitatea de curent,

$$\mathbf{J} = \frac{N \cdot \mathbf{I}_{\text{coil}}}{S}. \quad (7)$$

unde:  $I_{\text{coil}}$  [A] este curentul injectat,  $S$  [m<sup>2</sup>] este aria secțiunii conductorului, iar  $N$  reprezintă numărul de spire.

În analiza numerică a câmpului electromagnetic pentru DC-LATM studiat, interesează inducția magnetică în circuitul magnetic al motorului și caracteristica cuplu funcție de unghi, pe domeniul de lucru al DC-LATM. Cuplul electromagnetic,  $M_0$  [Nm] este parametrul principal al DC-LATM și este calculat utilizând tensorul tensiunilor Maxwell  $T_2$  [N/m<sup>2</sup>] [7]

$$n_1 \cdot T_2 = -\frac{1}{2} n_1 (\mathbf{H} \cdot \mathbf{B}) + (\mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{H}) \mathbf{B}^T, \quad (8)$$

respectiv

$$M_0 = \oint_{\Sigma} (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) \times (n_1 \cdot T_2) dS, \quad (9)$$

unde  $r_0$  este raza în raport cu axa de rotație, iar  $\Sigma$  este frontiera domeniului de calcul.

Pentru studiul transferului de căldură în DC-LATM studiat, se folosesc modele numerice tridimensionale, folosind metoda elementului finit [7 – 23]. Datele necesare formulării problemei de transfer de căldură pentru realizarea modelului numeric sunt:

- geometria;
- caracteristicile de material;
- sursele de căldură.

Motorul considerat este construit în clasa F de izolație. Astfel, temperatura maximă admisă este de 155°C.

Problema de transfer de căldură în DC-LATM consideră conducție termică. Sunt elaborate și analizate modelele matematice pentru estimarea temperaturilor în înfășurarea DC-LATM, în regimuri tranzitorii.

Ecuația pentru transferul de căldură realizat prin conducție între părțile solide, în regim tranzitoriu este

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q, \quad (10)$$

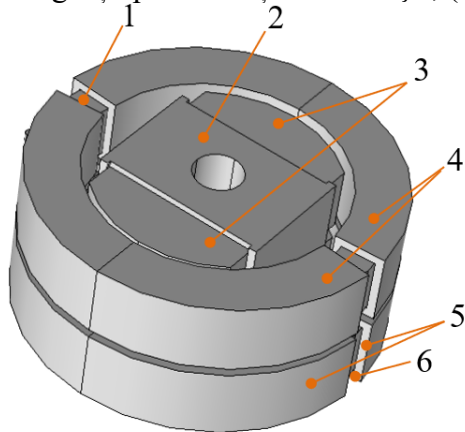
unde  $\rho$  [ $\text{kg/m}^3$ ] este densitatea materialului,  $C_p$  [ $\text{J/kg K}$ ] este capacitatea calorică,  $t$  [ $\text{s}$ ] este timpul,  $T$  [ $\text{K}$ ] este temperatura,  $k$  [ $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ] este conductivitatea termică și  $Q$  [ $\text{W/m}^3$ ] este sursa de căldură.

Software-ul utilizat pentru modelarea numerică este COMSOL Multiphysics, un pachet de programe pentru modelare ce are la bază metoda elementului finit [15].

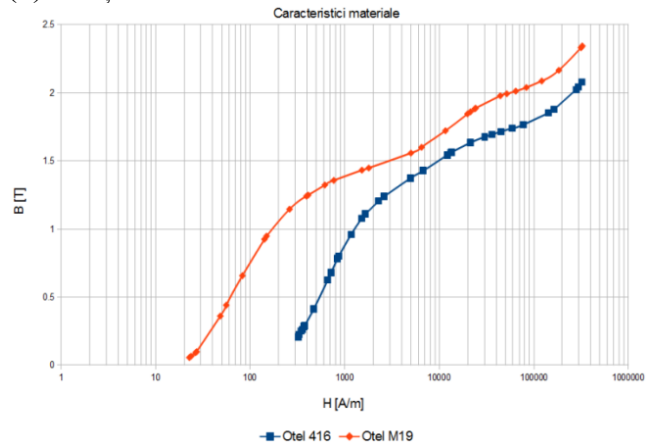
### 3. STUDII DE CÂMP ELECTROMAGNETIC ȘI TERMIC PENTRU UN MOTOR DE CUPLU DE CURENT CONTINUU CU UNGHII LIMITAT

Motorul de cuplu de curent continuu cu unghi limitat cu două canale este destinat aplicațiilor ce necesită rotirea într-un anumit domeniu unghiular.

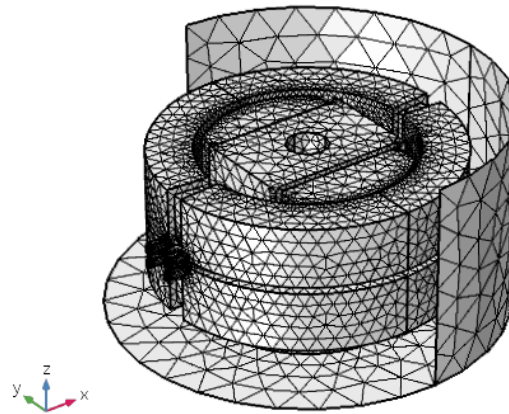
Modelul tri-dimensional (Fig. 1) conține (1) și (6) pachete de tole, (2) jugul rotor, (3) magneții permanenți de excitație, (4) și (5) înfășurarea statorică.



a) Părțile constructive.



b) Caracteristicile B-H pentru materialele feromagnetice.



c) Rețeaua de discretizare.

Fig. 1 – Părțile constructive, caracteristicile B-H pentru materialele feromagnetice și rețeaua de discretizare ale DC-LATM.

În construcția circuitului magnetic pentru acest motor se folosesc materiale magnetice moi și dure pentru rotor și materiale magnetice moi pentru stator [6]:

- tablă electrotehnică Fe-Si (Oțel M-22) pentru pachetul de tole statoric;
- conductor de cupru pentru bobinaj, izolat – lac poliesteric, clasă F;
- magneți pe bază de pământuri rare de tip NdFeB 37 ( $B_r = 1.25 \text{ T}$ );
- oțel feromagnetic (Oțel 416) – pentru arborele rotorului.

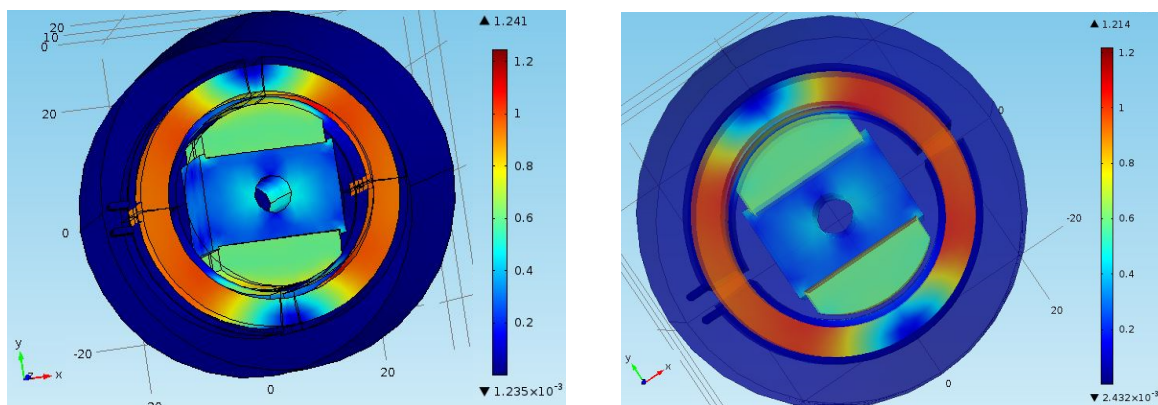
Caracteristicile B-H pentru materialele feromagnetice sunt prezentate în Fig. 1. Se generează rețeaua de discretizare pentru domeniul de calcul considerat în modelarea numerică pentru acest DC-LATM, prezentată în Fig. 1.

Având în vedere că acest tip de motor practic asigură funcționarea a două motoare în unul singur, poate fi folosit și ca soluție în sisteme redundante, însă funcționarea uzuală a acestuia presupune să aibă o singură înfășurare alimentată. Prin urmare, pentru analiza numerică a acestuia s-au considerat două cazuri, și anume DC-LATM cu o singură înfășurare alimentată și cu ambele înfășurări alimentate. În ambele cazuri, valoarea curentului este de 2 A.

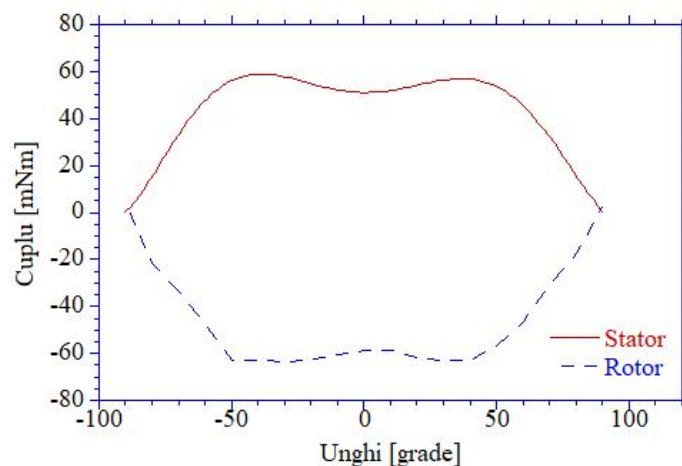
### 3.1 DC LATM: O singură înfășurare alimentată

Problemele de câmp electromagnetic și de transfer de căldură sunt cuplate:

Pentru problema de câmp electromagnetic, s-a evaluat inducția magnetică în motorul studiat și s-a calculat cuplul electromagnetic maxim, precum și curba cuplu funcție de unghi.



a) Harta de culoare a inducției magnetice. Valorile sunt în Tesla.



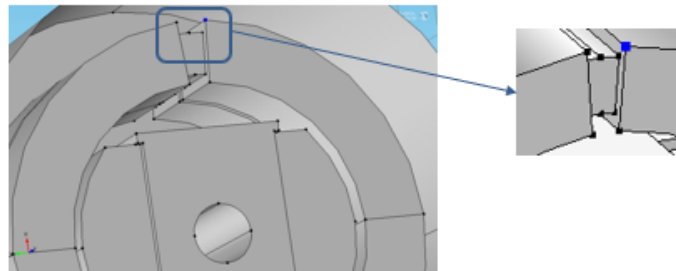
b) Caracteristicile cuplu-unghi obținute din modelul tridimensional.

Fig. 2 – Inducția magnetică și caracteristicile cuplu-unghi pentru DC-LATM.

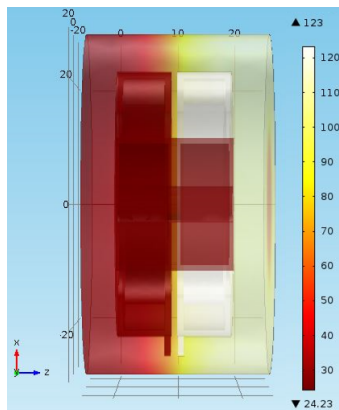
Figura 2, a arată harta de culoare a inducției magnetice, care evidențiază anumite secțiuni ale statorului care se apropie de limita de saturație (punctual, aceste valori ating o valoare maximă a inducției magnetice egală cu 1.24 T). Valorile inducției magnetice obținute sunt acceptabile pentru materialele alese.

Pentru caracteristicile cuplu-unghi prezentate în Fig. 2,b a fost realizat un studiu parametric față de poziția relativă stator-rotor. Incrementul unghiular este ales convenabil astfel încât să satisfacă atât acuratețea caracteristicii cuplu-unghi cât și timpul de calcul al modelului. Valoarea cuplului electromagnetic pentru acest caz este 61 mNm.

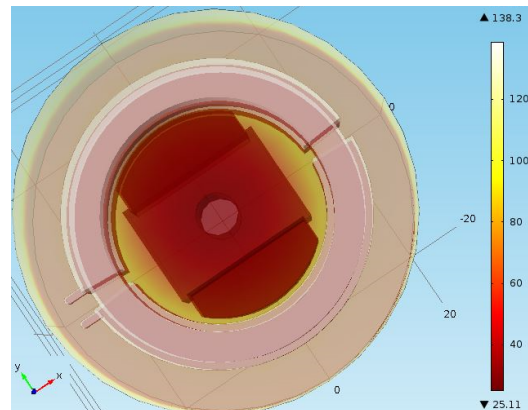
Pentru problema de transfer de căldură, s-a considerat temperatura mediului ambiant 22 °C. S-a analizat numeric distribuția temperaturii în întreg motorul în regim tranzitoriu. Punctul de calcul din înfășurarea motorului considerat pentru calculul temperaturii este prezentat în Fig. 3.a).



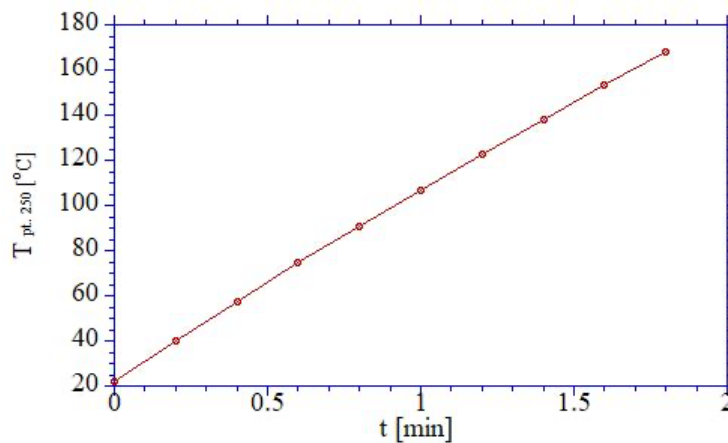
a) Punct de calcul din înfășurarea motorului considerat pentru calculul temperaturii.



b) Distribuția temperaturii în întreg motorul, la  $t = 1.2$  min.



c) Distribuția temperaturii în întreg motorul,  $t = 1.4$  min.



d) Graficul temperaturii în funcție de timp.

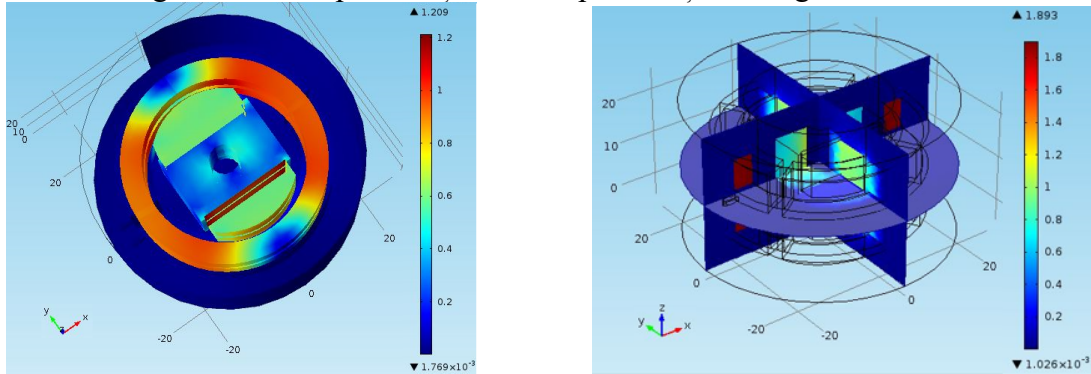
Fig. 3 – Punct de calcul din înfășurarea motorului considerat pentru calculul temperaturii, distribuția temperaturii în întreg motorul la diferite momente de timp și graficul temperaturii în funcție de timp pentru DC-LATM.

Figurile 3,b,c prezintă distribuția temperaturii în întreg motorul în regim tranzitoriu, la  $t = 1.2$  și  $1.4$  min. Se poate observa că anumite zone se încălzesc, temperatura ajungând la o valoare egală cu 138.3 °C la  $t = 1.4$  min în înfășurările motorului.

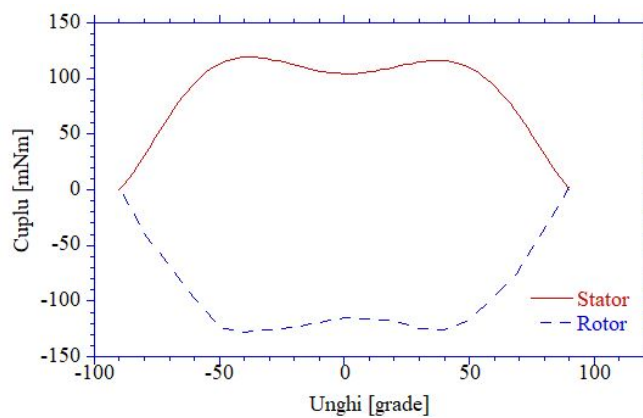
Analiza numerică și-a propus să arate evoluția în timp a temperaturii (Fig. 3,d) și implicit determinarea timpului în care temperatura din înfășurări ajunge la temperatura maximă admisă.

### 3.2 DC LATM: Ambele înfășurări alimentate

Pentru problema de câmp electromagnetic, s-a evaluat inducția magnetică, s-a calculat cuplul electromagnetic maxim precum și curba cuplu funcție de unghi.



a) Harta de culoare a inducției magnetice. Valorile sunt în Tesla.



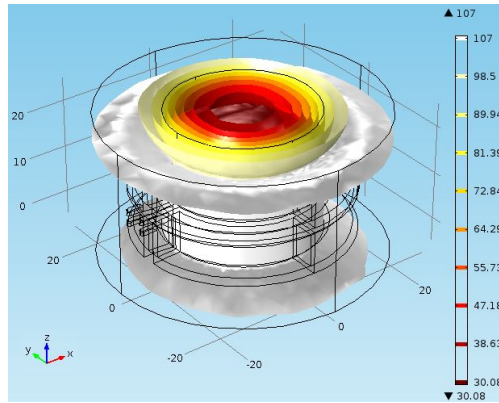
b) Caracteristicile cuplu-unghi obținute din modelul tridimensional.

Fig. 4 – Inducția magnetică și caracteristicile cuplu-unghi pentru DC-LATM.

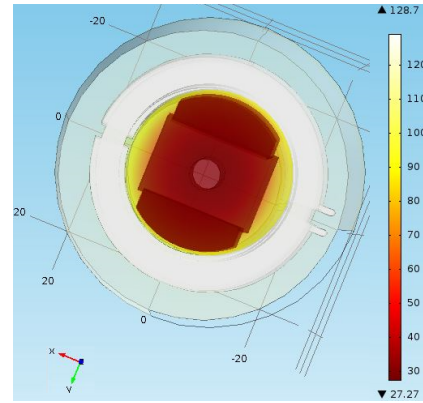
Figura 4.a) arată harta de culoare a inducției magnetice, care evidențiază anumite secțiuni ale statorului și care ajunge la valoarea de saturație (punctual, aceste valori ating o valoare maximă a inducției magnetice egală cu 1.89 T).

Caracteristicile cuplu-unghi sunt prezentate în Fig. 4.b) și valoarea cuplului electromagnetic pentru acest caz este 122 mNm. Comparând cu primul caz în care o singură înfășurare este alimentată, observăm că se dublează valoarea cuplului electromagnetic.

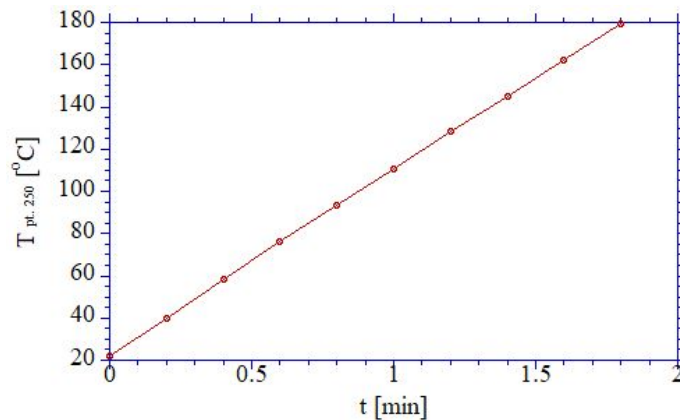
Pentru problema de transfer de căldură, s-a considerat temperatura mediului ambiant 22 °C. S-a analizat numeric distribuția temperaturii în întreg motorul în regim tranzitoriu. Punctul de calcul din înfășurarea motorului considerat pentru calculul temperaturii este prezentat în Fig. 3,a).



a) Distribuția temperaturii în întreg motorul,  $t = 1$  min.



b) Distribuția temperaturii în întreg motorul,  $t = 1.2$  min.



c) Graficul temperaturii în funcție de timp.

Fig. 5 – Distribuția temperaturii în întreg motorul la diferite momente de timp și graficul temperaturii în funcție de timp pentru DC-LATM.

Figurile 5,a,b prezintă distribuția temperaturii în întreg motorul în regim tranzitoriu, la  $t = 1$  și  $1.2$  min. Se poate observa că anumite zone se încălzesc, temperatura ajungând la o valoare egală cu  $129^{\circ}\text{C}$  la  $t = 1.2$  min în înfășurările motorului.

Analiza numerică și-a propus să arate evoluția în timp a temperaturii (Fig. 5,c) și implicit determinarea timpului în care temperatura din înfășurări ajunge la temperatura maximă admisă.

#### 4. CONCLUZII

În această lucrare s-a prezentat analiza de câmp electromagnetic și termic a unui motor de cuplu cu unghi limitat, folosind modele numerice tridimensionale. A fost considerată o singură valoare a curentului ( $I_m = 2$  A, curentul maxim).

S-au studiat două cazuri ale funcționării DC-LATM: cu o singură înfășurare alimentată și cu ambele înfășurări alimentate, pentru care s-a calculat inducția magnetică și caracteristica cuplu-unghi pentru fiecare dintre cele două cazuri. S-a observat ca inducția magnetică are valori normale pentru materialele folosite (FeSi) în primul caz și ajunge la valoarea de saturație în cel de-al doilea caz (1.89 T). Valoarea cuplului electromagnetic se dublează în cel de-al doilea caz (61 mNm, în primul caz, și 122 mNm, calculat în cel de-al doilea caz).

Transferul de căldură a considerat doar conducție (în interiorul subansamblurilor).

A fost stabilită evoluția în timp a temperaturii din înfășurarea motorului, considerând cele două variante prezentate.

În ambele cazuri, temperatura maximă se află în înfășurarea motorului (sursa de căldură) și variază punctual (de ordinul sutimilor de grad).



## CONFIRMĂRI

Lucrarea a fost prezentată la Simpozionul de Mașini Electrice SME'22, ediția a XVIII-a.

## BIBLIOGRAFIE

1. D. Stoia, *Motoare de curent continuu excitate cu magneți permanenți*, Editura Tehnică, București, 1983.
2. \*\*\*AXYS Catalogue, brushless DC motors, 2002.
3. \*\*\*Moog Catalogue, Direct drive brushless DC torque motors, 2013.
4. \*\*\*Precilec Catalogue, Permanent magnet generators and motors, 2013.
5. \*\*\*Bental motion systems, brushless motors, 2013.
6. \*\*\*Icpe catalogue, special electric machines, 2019.
7. \*\*\*"Componente electromecanice pentru sisteme high tech direct drive realizate cu linii tehnologice flexibile – HTDD", *Raport tehnic*, etapa 1.
8. \*\*\*"Componente electromecanice pentru sisteme high tech direct drive realizate cu linii tehnologice flexibile – HTDD", *Raport tehnic*, etapa 2.
9. 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*, *Journal of Applied Physics*, **93**, 10, pp.8689,8691, 2003.
10. P.R. Upadhyay, K.R. Rajagopal, *FE Analysis and computer-aided design of a sandwiched axial-flux permanent magnet brushless DC motor*, *IEEE Transactions on Magnetics*, **42**, 10, pp.3401,3403, 2006.
11. P.R. Upadhyay, K.R. Rajagopal, *FE analysis and CAD of radial-flux surface mounted permanent magnet brushless DC motors*, *Digests of the IEEE International Magnetics Conference -INTERMAG Asia-*, pp.729-730, 2005.
12. R. Obreja, I.R. Edu, *Limited Angle Torque Motors having high torque density, used in accurate Drive Systems*, *Acta Polytechnica*, **51**, 5, pp.75-83, 2011.
13. M.I. Andrei, N.M. Modreanu., *Numeric Modelling of a Two-Channel Limited Angle Torque Motor*, *EEA – Electrotehnică, Electronică, Automatică*, Editura. ELECTRA, **62**, 1, pp. 26-31, 2014.
14. Andrei M.I., Modreanu M., Ghițulescu L., *ACES methodology for a dc limited angle torque motor*, *Revue roumaine des sciences techniques, Série Électrotechnique et Énergétique*. 2019
15. \*\*\*Comsol Multiphysics documentation: <http://www.comsol.com/>
16. M.I. Andrei, N.M. Modreanu, M. Gutu, L. Ghițulescu, *Sistem de măsură asistat de calculator pentru caracterizarea motoarelor de cuplu cu unghi limitat*, *EEA – Electrotehnică, Electronică, Automatică*, Editura. ELECTRA, **62**, 3, pp. 11-17, 2014.
17. Boglietti, A. Cavagnino, D.A. Staton, *thermal analysis of TEFc induction motors*, *Proc. of IEEE International Conference PEDS*, Singapore, 2003.
18. Boglietti, A. Cavagnino, M. Lazzari, M. Pastorelli, *A simplified thermal model for variable-speed self-cooled industrial induction motor*, *IEEE Transactions on Industry Application*, **39**, 4, pp. 945 – 952, 2003.
19. 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*, **39**, 5, pp. 1314 – 1322, 2003.
20. E. Lebenhaft, *Field evaluation of slip-dependent thermal model for motors with high-inertia starting*, *Petroleum and Chemical Industry Technical Conference*,. PCIC '07, pp. 1 – 5, 2007.
21. 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)*, pp. 417 – 420, 2005.
22. R. Bernard, R. Glises, D. Chamagne, *3D thermal study of a low power electric motor with Flux3D*, *Flux-Magazine*, **37**, pp. 10 – 11, 2001.
23. 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, pp. 112-123, 2008.